



UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION

MÉMOIRE DE
Master 2 Génie Civil et Urbanisme

PARCOURS PHYSIQUE DU BÂTIMENT ET ENVIRONNEMENT

**Modélisation numérique d'un tunnel de vol
pour insectes : Comparaison des résultats
numériques et expérimentaux**

Soutenu par :
GARRY RIVIERE

Dirigé par
PR. ALAIN BASTIDE(PIMENT)
DR. SERGE QUILICI(CIRAD)

Soutenu le 4 septembre 2013



Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce stage de recherche ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement Monsieur Bastide, qui, en tant que directeur de ce mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Je tiens en second lieu à remercier Monsieur Quilici Serge du CIRAD, qui en tant que co-directeur m'a permis de réaliser ce stage en appliquant mes connaissances à un réel problème et de proposer des solutions au service d'une institution.

Mes remerciements s'adressent également à Samuel Nibouche du CIRAD qui m'a accueilli au sein de son service et qui s'est occupé de moi pendant ma période expérimentale.

Je remercie tous mes collègues stagiaires qui ont défilé pendant ces 6 mois, Rolf, Nicolas, Edouard, Vincent et Alexia du laboratoire PIMENT sans qui les journées auraient été bien longues au bureau. Je remercie chaleureusement Gauthier, Quentin, Amandine et Morganne (CIRAD) qui m'ont aidé à m'intégrer dans ce milieu de biologiste qui n'était pas forcément le mien.

J'exprime ma gratitude à Placide, docteur du laboratoire PIMENT pour ses conseils et son avis qui m'a permis de remettre en question certains éléments de ce travail de recherche.

Un remerciement spécial envers ma fiancée Lucie qui m'a accordé tout le temps nécessaire à la production de ce mémoire et qui m'a grandement aidé tant par son soutien moral que par son aide dans la correction du manuscrit.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce travail de recherche. Un dernier Merci à tous et à toutes. ...

à Lucie...

Résumé

Les tunnels de vols sont utilisés en entomologie pour des études olfactives sur les insectes. Le problème majeur rencontré dans ces expériences est le maintien d'un écoulement laminaire qui est difficile à obtenir au vu des conditions expérimentales selon les caractéristiques du tunnel. A cause d'une grande diversité des tunnels, il n'existe pas de méthode officielle pour le dimensionnement ainsi que la réduction de la turbulence. L'utilisation de la mécanique des fluides numérique est une démarche originale dans le dimensionnement ou l'optimisation de tunnel. L'ensemble des travaux qui ont été réalisés jusqu'à ce jour est le résultat d'études empiriques. Ce mémoire qui a pour plateforme expérimentale le tunnel de vol du CIRAD tente de comprendre les problèmes liés à la mécanique des fluides rencontrés par les équipes de chercheurs en entomologie. Il apporte ainsi une caractérisation expérimentale et une recherche de solution faiblement modificatrice de la structure existante. Par la suite une comparaison issue des résultats de simulations avec OpenFOAM et ceux obtenues par expérimentations sera présentée. L'utilisation de filtres et d'assemblages de tuyaux pour la réduction de la turbulence dans les tunnels de vols sera validée par l'outil numérique.

Enfin l'utilisation de la simulation sous OpenFOAM permettra de vérifier que l'utilisation de solutions techniques contre la turbulence n'est pas un frein au transport d'un composé odorant.

Mots clés : Tunnel de vol, Réduction de la turbulence, OpenFOAM, Ecoulement laminaire

Abstract

Wind tunnels are used in entomology for olfactory studies about insects. The main problem encountered in these experiments is the holding of a laminar flow which is difficult to get because of the experimental conditions according to the features of the tunnel. As there are several types of tunnels, no formal design method exists, nor the decrease of turbulence. The use of computational fluids dynamics is an original approach in the design or optimization of wind tunnels. The whole studies that have already been realized until today are the result of empirical studies. This report, which topic is the CIRAD wind tunnel, tries to understand the problems linked to the fluids dynamics that teams of entomologists encountered. Thus, it provides an experimental characterization and a search for a solution that modifies slightly the existing structure. Subsequently, there will be a presentation of a comparison from numerical studies results under OpenFOAM and those from some testings. Computational tool will confirm the use of screens and honeycombs to reduce the turbulence in the wind tunnels. Eventually, the use of CFD will verify that the use of technical solutions against turbulence is not an obstacle to carrying volatil materials.

Keywords : Wind tunnel, Reduction of turbulence, OpenFOAM, Laminar flow

Introduction	xv
1 Etat de l'art	1
1.1 Généralités	2
1.2 Types et Géométries	2
1.2.1 Tunnel de vol à air poussé	2
1.2.2 Tunnel de vol à faible vitesse d'air présentant des systèmes de réductions de turbulences [Visser, 1976]	3
1.2.3 Tunnel de vol à circuit d'air renouvelé [Visser et Griepink, 1996]	4
1.2.4 Tunnel de vol hémicylindrique [Felix, 2008]	5
1.3 Contrôle de la turbulence	6
1.3.1 Régime d'écoulement	6
1.3.2 Écoulement laminaire dans une conduite cylindrique	7
1.3.3 Écoulement laminaire entre deux plaques planes	8
1.3.4 Utilisation du régime laminaire	9
1.3.5 Méthodes de mesures	10
1.3.6 Écoulement sur des obstacles et apparitions d'instabilités	10
1.3.7 Dispositifs d'atténuation	12
1.3.8 Création volontaire de turbulence	14
1.4 Récapitulatif des caractéristiques techniques des tunnels de vol	16
1.5 Synthèse bibliographique	17
2 Caractérisation du tunnel existant	18
2.1 Caractéristiques géométriques	19
2.2 Caractérisation des profils de vitesse	19
2.2.1 Méthodologie de mesures	19
2.2.2 Études des profils de vitesse	20
2.2.3 Isocontours de vitesse	25

2.3	Synthèse la caractérisation du tunnel de vol	26
2.4	Modifications légères du Tunnel de vol	28
2.4.1	Ajout d'un filtre amortisseur de turbulence	28
2.4.2	Résultats et discussion	28
3	Modélisation géométrique physique et numérique du problème	35
3.1	Géométrie du domaine de calcul	36
3.1.1	Hypothèses simplificatrices	36
3.1.2	Composition par blocs de la géométrie	36
3.2	Maillage du domaine	37
3.3	Conditions aux limites	37
3.4	Modèle de turbulence et modèle de porosité	39
3.4.1	Modèle de turbulence	39
3.4.2	Modèle de porosité	40
3.5	Discrétisation des équations et mise en œuvre numérique	42
3.6	Suivi et contrôle des résultats	42
3.6.1	Etude de l'indépendance maillage/résultats	42
3.6.2	Etude de la convergence des résidus de calculs	44
3.7	Résultats et discussions	44
3.7.1	Champ de vitesse	44
3.7.2	Champ de pression	50
3.7.3	Énergie cinétique turbulente	52
3.8	Comparaison des résultats numériques et expérimentaux	54
3.8.1	Comparaison du profil de vitesse longitudinale	54
3.8.2	Comparaison des profils verticaux de vitesses	55
3.8.3	Comparaison des profils horizontaux de vitesses	56
3.9	Bilan	58
4	Transport d'un Composé organique volatil	60
4.1	Présentation du problème	61
4.2	Équation de transport	61
4.3	Modification du solveur existant	61
4.3.1	Modification du fichier scalarTransportFoam	61
4.3.2	Création d'un champs scalaire : concentration C	63
4.4	Conditions aux limites	65
4.5	Résultats et discussions	66
4.5.1	Convergence en résidus	66
4.5.2	Résultats de simulations	66
4.6	Bilan	68
	Conclusion générale et perspectives	69

Annexes	69
A Profils verticaux de l'amplitude de vitesses	70
A.1 Profils verticaux de l'amplitude de vitesse à $x=0,1\text{m}$	70
A.2 Profils verticaux l'amplitude de vitesse à $x=0,2\text{m}$	72
A.3 Profils verticaux l'amplitude de vitesse à $x=0,3\text{m}$	74
A.4 Profils horizontaux l'amplitude de vitesse à $x=0,4\text{m}$	76
A.5 Profils horizontaux l'amplitude de vitesse à $x=0,5\text{m}$	78
A.6 Profils horizontaux l'amplitude de vitesse à $x=0,6\text{m}$	80
A.7 Profils verticaux l'amplitude de vitesse à $x=0,7\text{m}$	82
A.8 Profils verticaux l'amplitude de vitesse après ajout d'un filtre amortisseur de turbulence	84
A.9 Profils horizontaux l'amplitude de vitesse après ajout d'un filtre amortisseur de turbulence	86
B Caractéristiques du tunnel de vol	88
B.1 Caractéristique du caisson de ventilation	88

TABLE DES FIGURES

1.1	Représentation imagée du tunnel de vol [Miller et Roelofs, 1978]	3
1.2	Représentation détaillée du tunnel de vol [Visser, 1976]	4
1.3	Représentation détaillée du tunnel de vol [Visser et Griepink, 1996]	5
1.4	Représentation détaillée du tunnel de vol [Felix, 2008]	6
1.5	Etablissement du régime laminaire dans une conduite cylindrique	7
1.6	Profil de vitesse analytique d'un écoulement laminaire dans une conduite cylindrique	8
1.7	Profil de vitesse analytique d'un écoulement laminaire entre deux plaques planes . .	9
1.8	Distribution verticale des écarts de vitesse d'air mesurée à 50cm/s sur l'axe central du tunnel de vol $air\ speed\ deviation(\%) = \frac{u-u_i}{u_i} * 100$ [Visser et Griepink, 1996] . . .	10
1.9	Allée de Von karman pour un nombre de Reynolds de 105 [Van Dyke, 1982]	11
1.10	Représentation d'une chambre de mélange (d) [Cardé et Hagaman, 1979]	12
1.11	Module de rétrécissement pour tunnel de vol	12
1.12	Position de la structure en nid d'abeille dans un tunnel de vol [Kainoh, 2011]	13
1.13	Remplacement de la structure en nid d'abeille (a) par des petits tubes (b) dans un tunnel de vol [Kainoh, 2011]	13
1.14	Schéma du tunnel avec présence de « becquets » pour la création de turbulence . . .	14
2.1	Représentation en 3 dimensions du tunnel de vol	19
2.2	Position des points de mesures dans le tunnel de vol	20
2.3	Plan de symétrie vertical	20
2.4	Plan de symétrie horizontal	20
2.5	Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à y=0,23m	21
2.6	Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à y=0,46m	21
2.7	Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à y=0,92m	22
2.8	Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à y=1,61m	22
2.9	Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à y=2,07m	22
2.10	Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,23m	23
2.11	Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,46m	23

2.12	Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,92\text{m}$	24
2.13	Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,38\text{m}$	24
2.14	Profil vertical de l'amplitude de vitesse U_y à $y=2,07\text{m}$	24
2.15	Isocontours de vitesse dans le plan XZ à $y = 0,23\text{m}$	25
2.16	Position du plan XZ à $y = 1,15\text{m}$	26
2.17	Isocontours de vitesse dans le plan XZ à $y = 1,15\text{m}$	26
2.18	Position du plan XZ à $y = 2,07\text{m}$	26
2.19	Isocontours de vitesse dans le plan XZ à $y = 2,07\text{m}$	26
2.20	Filtre amortisseur de turbulence pour le tunnel de vol	28
2.21	Profil horizontale de l'amplitude de vitesse à $y=0,46\text{m}$	29
2.22	Profil horizontale de l'amplitude de vitesse à $y=0,69\text{m}$	29
2.23	Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=0,92\text{m}$	29
2.24	Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=1,15\text{m}$	29
2.25	Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=1,38\text{m}$	30
2.26	Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=1,61\text{m}$	30
2.27	Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=1,84\text{m}$	30
2.28	Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=2,07\text{m}$	30
2.29	Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,46\text{m}$	31
2.30	Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,69\text{m}$	31
2.31	Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,92\text{m}$	31
2.32	Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,15\text{m}$	31
2.33	Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,38\text{m}$	32
2.34	Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,61\text{m}$	32
2.35	Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,84\text{m}$	32
2.36	Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=2,07\text{m}$	32
2.37	Comparaison de l'écart-type au point de mesure $y=1,84$ $x=0,4$ $z=0,1$	33
2.38	Comparaison de l'écart-type au point de mesure $y=0,69$ $z=0,6$ $x=0,4$	34
3.1	Décomposition par blocs du domaine de simulation	36
3.2	Maillage du domaine de simulation vue dans le plan yz	37
3.3	Conditions aux limites des grandeurs	38
3.4	Vue détaillée du filtre	41
3.5	Test indépendance maillage/Résultats	43
3.6	Convergence des résidus de calculs	44
3.7	Champ de vitesse horizontal du tunnel sur le plan zy à $x=0,4\text{m}$	45
3.8	Lignes de courants du tunnel de vol	45
3.9	Profil de vitesse sur l'axe y à $x = 0,4\text{m}$ et $z = 0,4\text{m}$	46
3.10	Profil vertical de vitesse U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 0,23\text{m}$	47
3.11	Profil vertical de vitesse U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 1,15\text{m}$	47
3.12	Profil vertical de vitesse U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 1,61\text{m}$	48

3.13	Profil vertical de vitesse U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 2,07\text{m}$	48
3.14	Profil Horizontal de vitesse U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 0,23\text{m}$	49
3.15	Profil Horizontal de vitesse U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 1,15\text{m}$	49
3.16	Profil Horizontal de vitesse U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 1,61\text{m}$	50
3.17	Profil Horizontal de vitesse U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 2,07\text{m}$	50
3.18	Champ de pression du tunnel sur le plan zy à $y=0,4\text{m}$	51
3.19	Profil de Pression sur l'axe y à $x = 0,4\text{m}$ et $z = 0,4\text{m}$	52
3.20	Evolution de l'énergie cinétique turbulente sur l'axe y à $x = 0,4\text{m}$ et $z = 0,4\text{m}$	53
3.21	Comparaison des données expérimentales et résultats de simulations sur l'axe y à $x = 0,4\text{m}$ et $z = 0,4\text{m}$	54
3.22	Comparaison des profils verticaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 0,23\text{m}$	55
3.23	Comparaison des profils verticaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 1,15\text{m}$	55
3.24	Comparaison des profils verticaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 1,61\text{m}$	56
3.25	Comparaison des profils verticaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 2,07\text{m}$	56
3.26	Comparaison des profils horizontaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 0,23\text{m}$	57
3.27	Comparaison des profils horizontaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 1,15\text{m}$	57
3.28	Comparaison des profils horizontaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 1,61\text{m}$	58
3.29	Comparaison des profils horizontaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 2,07\text{m}$	58
4.1	Processus du calcul du transport de matière	65
4.2	Conditions aux limites des grandeurs pour le calcul du transport de COV	65
4.3	Convergence des résidus de calculs pour la résolution de l'équation de transport	66
4.4	Champ du transport de matière C	67
4.5	Évolution de la concentration C sur l'axe y à $x = 0,4\text{m}$ et $z = 0,4\text{m}$	67

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Tableau récapitulatif des caractéristiques techniques des tunnels de vols (N.C :Non communiqué par l’auteur)	16
2.1	Récapitulatif des caractéristiques du tunnel de vol du CIRAD	19
3.1	Caractéristiques des maillages pour le test d’indépendance	43

LISTINGS

4.1 Modification du solveur *scalarTransportFoam* 62

4.2 Création du champ scalaire concentration C 63

4.3 Création du fichier constante concentration C 64

LISTE DES SYMBOLES

α	Porosité	[-]
β	Coefficient d'expansion thermique	[-]
ΔP	Différence de pression entre l'entrée et la sortie du tube	[Pa]
μ	Viscosité dynamique du fluide	[Pa · s]
ν	Viscosité cinématique du fluide	m ² · s
\bar{u}	Vitesse moyenne du fluide	[m/s]
ρ	Masse volumique du fluide	[kg/m ³]
σ_ε	Constante du modèle $k - \varepsilon$	[-]
σ_k	Constante du modèle $k - \varepsilon$	[-]
ε	Taux de dissipation de l'énergie turbulente	[m ² /s ³]
C_μ	Constante du modèle $k - \varepsilon$	[-]
D	Diamètre de l'obstacle	[m]
D	Nombre de Darcy	[m ⁻¹²]
d	distance entre les deux plaque	[m]
d_f	Diamètre du fil de nylon	[m]
D_H	Diamètre caractéristique du conduit	[m]
F	Paramètre de résistance inertielle	[m ⁻¹]
f	Fréquence de détachement des tourbillons	[-]
g	Constante gravitationnelle	[S.I]
I	Intensité turbulente	[%]
k	Energie cinétique turbulente	[m ² /s ²]

l	Longueur de l'échelle turbulente	[m]
m	Distance verticale entre deux fils dans un filtre	[m]
n	Distance horizontale entre deux fils dans un filtre	[m]
P	Périmètre mouillé du tunnel	[m]
P_b	Terme de production du modèle $k - \varepsilon$	[-]
P_k	Terme de production du modèle $k - \varepsilon$	[-]
q_v	Débit volumique	[m ³ /s]
R	Rayon du tube	[m]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
S	Surface d'une section du tunnel de vol	[m ²]
u	Vitesse du fluide	[m/s]
u_∞	Vitesse du fluide au loin de l'obstacle	[m/s]
U_{crit}	Vitesse critique du fluide	[m/s]
u_i	Vitesse initiale du fluide	[m/s]
u_{max}	Vitesse maximale du fluide	[m/s]

L'ÉTUDE comportementale des insectes en tunnel de vol permet de comprendre au mieux la réponse aux stimuli olfactifs des plantes sur les insectes. Pour réaliser leurs expérimentations, les entomologistes ont besoin de décrire le déplacement et l'attraction des insectes envers les phéromones. Pour se faire, cela nécessite que les conditions d'expérimentations soient connues et fixes. Un écoulement d'air laminaire est souhaité.

L'unité d'écologie terrestre et de lutte intégrée du CIRAD possède dans son laboratoire un tunnel de vol pour insectes. Celui-ci pose des problèmes lors des expérimentations à cause de l'écoulement d'air. Ce mémoire s'intéresse à la maîtrise et au contrôle d'un régime d'écoulement laminaire au sein d'un tunnel de vol. De plus, il se place dans une démarche explicative des problèmes rencontrés par le CIRAD grâce à la simulation numérique sous OpenFOAM.

L'étude de ce sujet mène à plusieurs problématiques qui sont les suivantes : Existe-il un type de tunnel de vol spécifique utilisé en olfactométrie ? Quelles méthodes sont utilisées pour réduire la turbulence dans les tunnels à faible vitesse d'air ? La simulation numérique peut-elle intervenir dans le dimensionnement de tunnels de vol pour insectes ?

Ce mémoire propose une réponse à ces problématiques en se structurant en quatre chapitres. Le premier propose un état de l'art sur les tunnels de vol en entomologie, il apportera également des éléments sur les régimes d'écoulement ainsi que les solutions utilisées pour réduire la turbulence dans les tunnels de vol. Le second chapitre met en avant le diagnostic expérimental nécessaire à la compréhension des problèmes de mécanique des fluides rencontrés par le CIRAD dans leur tunnel. Aussi ce chapitre met en avant l'utilisation de systèmes pour réduire la turbulence et voir ses effets sur la structure de l'écoulement.

Le troisième chapitre propose une modélisation numérique du tunnel de vol du CIRAD et la validation par la simulation de l'utilisation de systèmes anti-turbulences.

Enfin le dernier chapitre lui présente par la voie numérique les effets d'un filtre sur le transport de particules d'un composé organique volatil.

CHAPITRE 1

ETAT DE L'ART

Sommaire

1.1	Généralités	2
1.2	Types et Géométries	2
1.3	Contrôle de la turbulence	6
1.4	Récapitulatif des caractéristiques techniques des tunnels de vol	16
1.5	Synthèse bibliographique	17

1.1 Généralités

Les tunnels de vol sont utilisés dans plusieurs contextes notamment l'étude des profils d'ailes d'avions, les vols d'oiseaux ou encore en entomologie sur l'étude comportementale des insectes. Les premières expérimentations en entomologie ont commencé dans les années 1940 avec les travaux de Kennedy sur les réponses aux stimuli visuels des insectes. Cette méthode d'étude connaît son essor dans les années 70, notamment sur la réponse des insectes aux stimuli olfactifs de différents phéromones. Il n'existe aucune règle précise et particulière dans la construction et le design des tunnels de vol. Des essais furent réalisés sur des tunnels verticaux. Cependant cela n'a pas donné de résultats concluants. Les études portent donc en grande majorité sur des écoulements d'air à l'horizontal. Cette notion d'écoulement d'air introduit deux types de tunnels de vol [Baker et Linn Jr., 1984] :

- les tunnels à air soufflé ;
- les tunnels à air aspiré.

La comparaison entre ces deux types de tunnels proposée par Baker en 1984

[Baker et Linn Jr., 1984] précise que le choix d'un tunnel à air poussé a donné des résultats plus satisfaisants. Il y a différentes façons d'introduire l'air dans le tunnel : la façon la plus simple est l'utilisation d'un ventilateur à pales relié à un conduit en plastique, généralement souple et assemblé au tunnel de vol. Cardé [Cardé et Hagaman, 1979] utilise un conduit rigide en plexiglas qui épouse la forme circulaire du ventilateur d'un côté, et de l'autre côté la forme rectangulaire du tunnel de vol. La prédictibilité et la structure laminaire de l'écoulement sont essentielles dans l'interprétation des résultats comportementaux des insectes. Un écoulement laminaire permet ainsi de ne pas fatiguer l'insecte et de ne pas fausser l'étude. Il faut donc réduire ou supprimer la turbulence dans le tunnel de vol. L'amortissement de la turbulence s'effectue de différentes façons, notamment par l'utilisation d'une chambre de mélange [Miller et Roelofs, 1978], [Cardé et Hagaman, 1979] ou par l'utilisation de filtres (tulles, grillages de nylon). Bien qu'il soit préférable d'avoir un écoulement laminaire Baker [Baker et Linn Jr., 1984] précise que lors de l'utilisation de mélanges de phéromones, l'obtention d'une structure laminaire n'est pas nécessaire pour obtenir un vol d'insecte.

1.2 Types et Géométries

1.2.1 Tunnel de vol à air poussé

Une étude reprend le modèle de tunnel de vol de Kennedy [Kennedy *et al.*, 1974], notamment l'expérimentation de Miller [Miller et Roelofs, 1978] qui présente les résultats d'une étude comportementale de papillons de nuit soumis à des phéromones sexuelles. Ces expérimentations ont repris exactement le même tunnel de vol que Kennedy [Kennedy *et al.*, 1974].

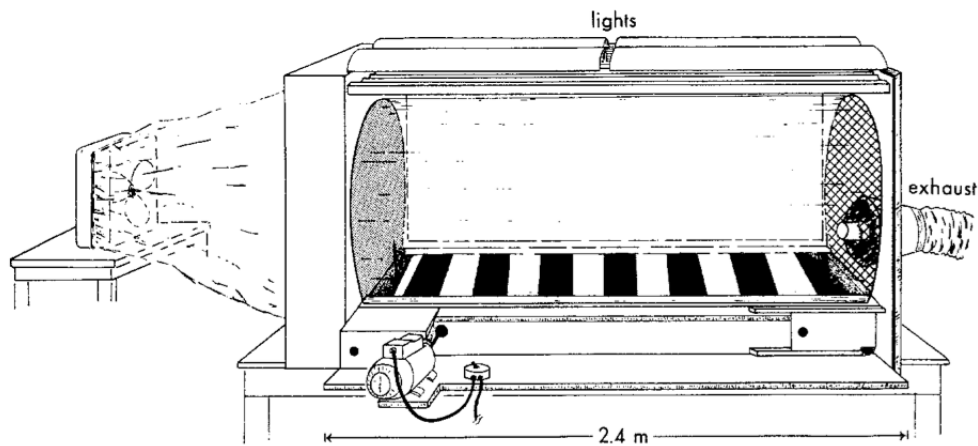
Description du tunnel de vol [Miller et Roelofs, 1978]

FIGURE 1.1 – Représentation imagée du tunnel de vol [Miller et Roelofs, 1978]

Le tunnel de vol est une chambre composée de deux feuilles de plexiglas situées de chaque côté verticale du tunnel et de dimensions $(1,22 \times 2,44 \times 0,002\text{m})$. Les feuilles sont fixées par une structure en contreplaqué. Le tout étant situé dans un environnement où la température et l'humidité sont contrôlées. Le tunnel a une dimension de 2,44m de long 1,22m de haut. La largeur supérieure du tunnel est elle de 0,96m et sa largeur inférieure est de 0,89m. Le soufflage se fait par un ventilateur à pales dans un orifice circulaire. L'air est repris en sortie de tunnel par une orifice circulaire.

1.2.2 Tunnel de vol à faible vitesse d'air présentant des systèmes de réductions de turbulences [Visser, 1976]

Cette étude expérimentale [Visser, 1976] présente de façon détaillée un tunnel de vol à faible vitesse d'air.

Description du tunnel de vol [Visser, 1976]

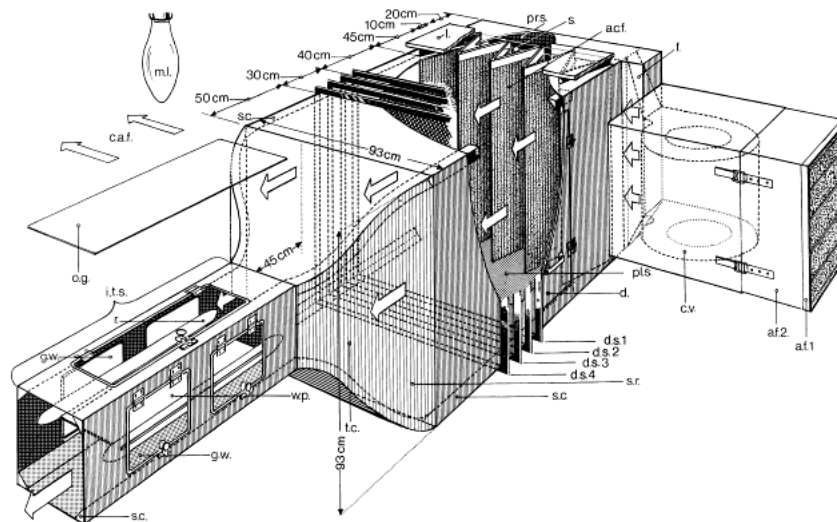


FIGURE 1.2 – Représentation détaillée du tunnel de vol [Visser, 1976]

Ce tunnel parallélépipédique en verre est composé de deux parties : la première partie traite l'écoulement d'air et la deuxième sert aux études sur le comportement des insectes. Un ventilateur centrifuge (cv) aspire l'air à travers deux filtres à air (af1,af2). L'air passe ensuite au travers d'une grille de 80 trous et d'un filtre à charbon actif (acf). Ce filtre à charbon actif est constitué de plaques métalliques perforées pliées, espacés de 17 mm d'intervalle et remplis de pastilles de charbon actif. L'air filtré de toute impureté passe ensuite dans la zone où sont disposés les plantes (pls). [Visser, 1976] propose ensuite une zone d'amortissement de turbulence en faisant passer l'air au travers de quatre filtres composés chacun de 18 mailles d'amortissement en fil de 0,34 mm d'épaisseur (ds1 à ds4). La zone (sr) et le cône de contraction (tc) permettent de diminuer l'intensité de la turbulence (cf. section 1.3.7) de l'air circulant dans la section du tunnel la plus étroite. Enfin la deuxième partie du tunnel qui sert aux expérimentations est composée de plaques en verre. L'air ressort directement dans la pièce.

1.2.3 Tunnel de vol à circuit d'air renouvelé [Visser et Griepink, 1996]

Dans de nouvelles expérimentations VISSER [Visser et Griepink, 1996] propose un tunnel à circuit d'air fermé. Selon l'auteur son tunnel de vol a été mis en place pour favoriser le contrôle de la température et de l'humidité. Cependant pour éviter la contamination de toute la structure par les phéromones, il est nécessaire de procéder à un renouvellement régulier de l'air.

Description du tunnel de vol [Visser et Griepink, 1996]

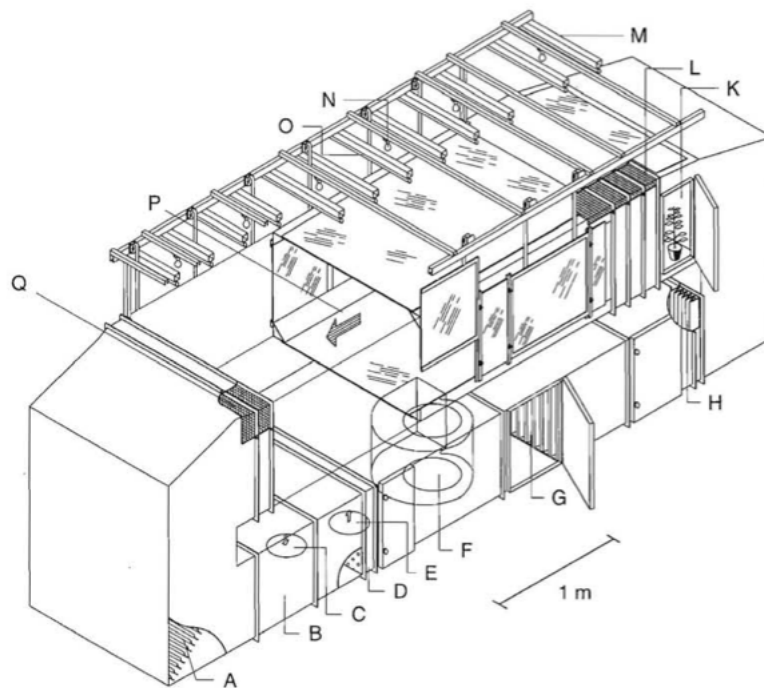


FIGURE 1.3 – Représentation détaillée du tunnel de vol [Visser et Griepink, 1996]

La figure 1.3 présente un tunnel de vol parallélépipédique. Celui-ci est composé d'une zone supérieure de vol (P) et d'une zone inférieure où l'écoulement de l'air est « traité ». L'air est poussé par un ventilateur compact (F), couplé à un régulateur de vitesse à variation continue. L'air passe ensuite au travers d'une plaque métallique de dimensions (40×50) perforée de trous de 10 mm de largeur qui selon Visser [Visser et Griepink, 1996] force le courant à utiliser la section transversale complète du tunnel. L'air est ensuite filtré par un filtre à charbon actif (G) suivi de deux filtres à air traditionnels (H). La turbulence de l'air est atténuée par quatre filtres en acier inoxydable constitués de 40 mailles de 0,14 mm de diamètre, placés à des intervalles de 10 cm (L). La section vol a pour dimensions 3 m de long pour 1,3 m de large et pour une hauteur de 0,8 m. Les dimensions de la partie inférieure du tunnel de vol sont de $1,22 \times 0,61$ m. Cette zone possède aussi deux filtres qui ont pour rôle l'amortissement de la turbulence (cf. section 1.3.7 avec pour dimensions 1,30 cm de large et 0,80 cm de haut).

1.2.4 Tunnel de vol hémicylindrique [Felix, 2008]

FELIX A.E propose dans sa thèse [Felix, 2008] une forme de tunnel de vol assez atypique. Cette étude expérimentale a porté sur les Lépidoptères africains fait appel à tunnel de forme hémicylindrique.

Description du tunnel de vol

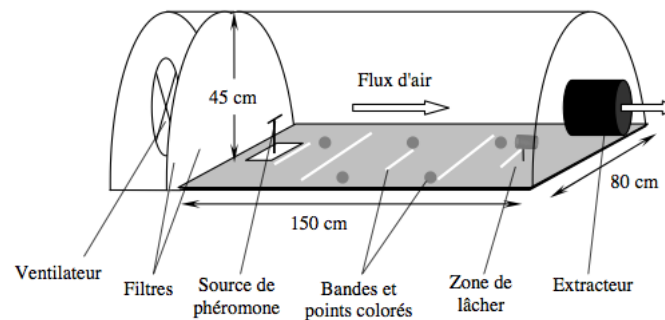


FIGURE 1.4 – Représentation détaillée du tunnel de vol [Felix, 2008]

Le tunnel de vol utilisé (Figure 1.4) est un hémicylindrique de 1,90m de long, 0,80m de large et 0,45m de haut. Le tunnel possède une chambre de mélange de 0,4 m de long et une zone de vol pour les insectes de 1,5m . L'auteur précise que l'écoulement d'air au sein du tunnel est de type laminaire avec une vitesse de 0,6 m/s. Cependant, la présentation des mesures de vitesse d'air est succincte. L'air y est à la fois poussé par un ventilateur et tiré par un extracteur présent en sortie de tunnel.

1.3 Contrôle de la turbulence

L'étude comportementale des insectes aux stimuli en tunnels de vol permet d'obtenir des réponses sur leurs trajectoires de vol ou encore sur leurs réponses olfactives. Pour permettre cela, il faut avoir un écoulement d'air laminaire pour permettre d'avoir de bons résultats expérimentaux. L'obtention d'un profil d'air laminaire passe par le contrôle de la turbulence.

1.3.1 Régime d'écoulement

La notion de régime d'écoulement est fondamentale en aérodynamique car celle-ci influe fortement sur les résultats expérimentaux. Plusieurs régimes d'écoulements ont été mis en évidence par l'expérience de Reynolds [Reynolds, 1883] notamment :

- le régime laminaire.
- le régime transitoire.
- et le régime turbulent.

Le régime de l'écoulement est fonction du diamètre du conduit, de la vitesse du fluide, de la viscosité du fluide ou encore de la masse volumique. Le nombre de Reynolds est alors introduit pour décrire le régime. Il s'exprime de la façon suivante :

$$\text{Re} = \frac{u D_H}{\nu} \quad (1.1)$$

ou encore par :

$$\text{Re} = \frac{\rho u D_H}{\mu} \quad (1.2)$$

où u est la vitesse fluide (m/s), D_H le diamètre caractéristique du conduit (m), ρ la masse volumique du fluide (kg/m^3) μ la viscosité dynamique du fluide ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) et ν la viscosité cinématique du fluide ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$) avec $\nu = \frac{\mu}{\rho}$. le passage du régime laminaire au régime turbulent s'effectue pour un nombre de Reynolds égal à 2000.

1.3.2 Ecoulement laminaire dans une conduite cylindrique

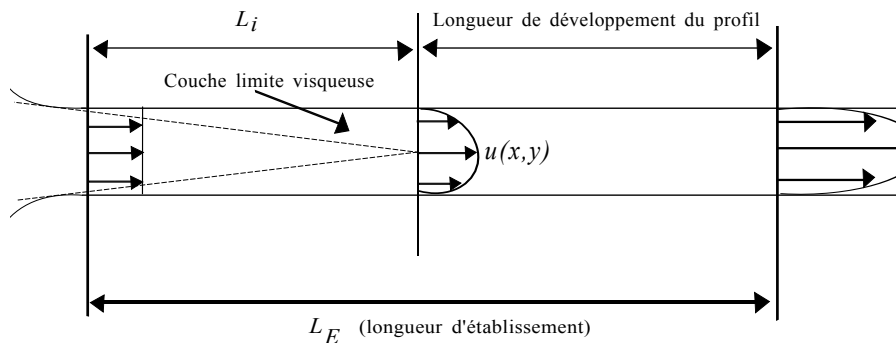


FIGURE 1.5 – Etablissement du régime laminaire dans une conduite cylindrique

Les frottements visqueux sont à l'origine du ralentissement du fluide proche de la paroi, il en résulte le développement d'une couche limite. Le débit est conservé dans toute la longueur de la section et la zone centrale de l'écoulement est soumise à une accélération. Suite au développement des couches limites, le profil des vitesses se déforme progressivement et atteint la forme parabolique. Une fois atteinte, ce profil n'évolue plus, et l'on dit dès lors que l'écoulement est dynamiquement établi. La distance entre l'entrée du tuyau et la zone à partir de laquelle l'écoulement est établi est appelée longueur d'établissement l_e .

Une fois l'écoulement dynamiquement établi il possède une forme parabolique (figure 1.7), celui-ci se retrouve dans la résolution des équations de Navier-Stokes. L'expression de la solution exacte de l'écoulement laminaire dans une conduite cylindrique avec une condition de symétrie ($u(r) = 0$) est :

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{\Delta P}{L} (R^2 - r^2) \quad (1.3)$$

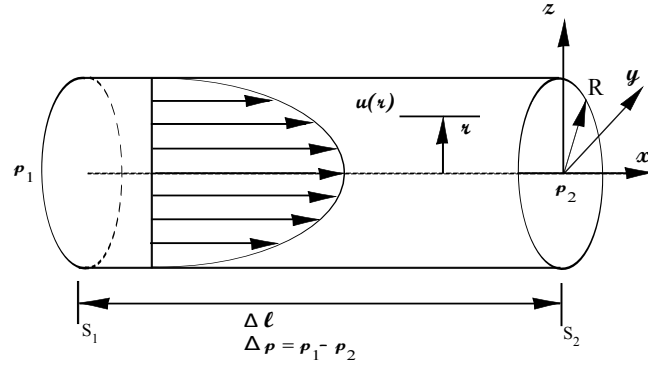


FIGURE 1.6 – Profil de vitesse analytique d'un écoulement laminaire dans une conduite cylindrique

avec R et L , rayon et longueur du tube et ΔP la différence de pression entre les deux extrémités. La vitesse maximale au sommet de la parabole est donnée par l'expression :

$$u_{max} = \frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \quad (1.4)$$

L'expression du débit volumique est donnée par la relation de Poiseuille :

$$q_v = \frac{\pi}{8\mu} R^4 \frac{\Delta P}{L} \quad (1.5)$$

On peut en déduire la vitesse moyenne \bar{u} :

$$\bar{u} = \frac{q_v}{S} = \frac{q_v}{\pi R^2} = \frac{R^2}{8\mu} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \quad (1.6)$$

soit :

$$\bar{u} = \frac{u_{max}}{2} \quad (1.7)$$

1.3.3 Écoulement laminaire entre deux plaques planes

Pour un écoulement entre deux plaques planes, une solution avec des conditions limites symétriques est :

$$u_{max} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^2}{8\mu} \quad (1.8)$$

le débit volumique par unité de largeur du canal :

$$q_v = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^3}{12\mu} \quad (1.9)$$

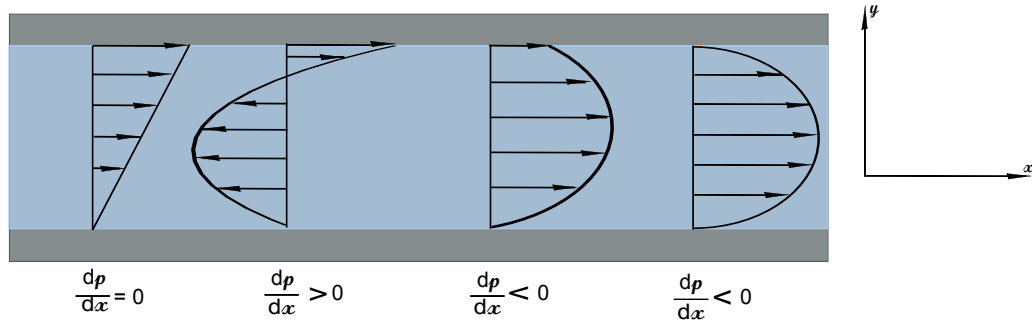


FIGURE 1.7 – Profil de vitesse analytique d'un écoulement laminaire entre deux plaques planes

La vitesse moyenne \bar{u} en est déduite :

$$\bar{u} = \frac{q_v}{S} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{d^2}{12\mu} \quad (1.10)$$

1.3.4 Utilisation du régime laminaire

Le régime laminaire est le plus utilisé dans le tunnel de vol des entomologistes, celui-ci permettant une meilleure analyse du comportement des insectes. Visser [Visser, 1976] propose le dimensionnement de son tunnel se basant sur cette notion de nombre de Reynolds. Il utilise ainsi une vitesse critique d'air qui s'exprime de la façon suivante :

$$U_{crit} = \frac{2300 \times \nu}{D_H} \quad (1.11)$$

Où 2300 correspond au nombre de Reynolds critique (nombre pour lequel le régime de l'écoulement change). ν est la viscosité cinématique et D_H représente le diamètre hydraulique. Ce diamètre hydraulique est égal à :

$$D_H = \frac{4 \times S}{P} \quad (1.12)$$

Où S est la surface de la section du tunnel de vol et P est le périmètre du tunnel de vol. L'auteur propose plusieurs méthodes pour réduire la turbulence :

- Augmentation de la distance entre la zone de test et la zone obstruée (filtres à air) ;
- La zone obstruée doit être plus large que la zone de test ;
- installation d'un filtre (tulle ou gaze) ;
- Rétrécissement de la section du tunnel de vol en entrée de zone de test.

L'optimisation de l'épaisseur de la couche limite au niveau des bords des parois permet d'améliorer l'uniformité du champ de vitesse. Bien que les différentes expérimentations montrent la présence de régime laminaire, l'étude olfactive du panache de composés organiques volatils montre une diffusion spatiale irrégulière. [Miller et Roelofs, 1978] a montré que la densité de ce panache est hétérogène sur toute la largeur et la hauteur du tunnel. On constate une forte densité dans la direction centrale de l'émission de fumée et un affaiblissement sur les bords.

1.3.5 Méthodes de mesures

La mesure de la qualité du régime de l'écoulement de l'air n'est pas une priorité dans la recherche en entomologie. Les entomologistes effectuent leurs mesures essentiellement à l'aide d'anémomètre à fil chaud. La détection de la turbulence se fait notamment sur des critères visuels en étudiant les panaches de fumée [Miller et Roelofs, 1978]. La publication de Visser [Visser et Griepink, 1996] est l'une des seules qui présente une réelle étude des profils de vitesse. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un anémomètre à fil chaud et l'auteur qualifie le profil de l'écoulement d'« assez uniforme ». Pour cela il propose de comparer des données prises avant et après les filtres d'amortissement décrits dans la section 1.3.7 .

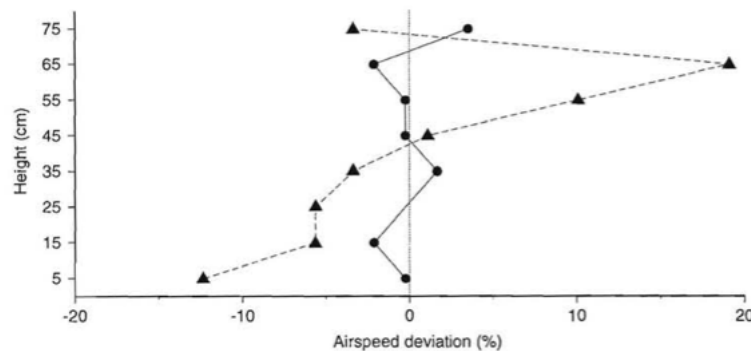


FIGURE 1.8 – Distribution verticale des écarts de vitesse d'air mesurée à 50cm/s sur l'axe central du tunnel de vol $air\ speed\ deviation(\%) = \frac{u-u_i}{u_i} * 100$ [Visser et Griepink, 1996]

La figure 1.8 présente l'écart de la distribution verticale des vitesses. La courbe en pointillés montre les résultats d'un point dans la partie centrale du tunnel, situé à 5 cm avant le premier filtre d'amortissement, et la seconde courbe présente les résultats d'un point de mesure situé à 30 cm en aval de l'écran d'amortissement. VISSER [Visser et Griepink, 1996] précise alors que les courbures du tunnel sont à l'origine d'une distribution inégale du profil de vitesse. L'important écart de vitesse à 65 cm est corrigé par les filtres d'amortissement avant d'entrer dans la section vol.

1.3.6 Écoulement sur des obstacles et apparitions d'instabilités

Lors des expérimentations, les éléments olfactifs sont parfois des plantes ou des arbustes en pots. L'écoulement d'air sur ces obstacles peuvent conduire à la formation de petits tourbillons. Pour un nombre de Reynolds compris entre $48 \leq Re \leq 180$, l'écoulement est instationnaire. Au-delà d'une valeur critique du nombre de Reynolds ($Re \approx 48$), les zones de recirculation en aval du cylindre deviennent instables et sensibles à de petites perturbations qui conduisent au déclenchement de l'instabilité de Von Karman. Les deux tourbillons perdent leur symétrie par rapport à l'axe longitudinal (figure 1.9).

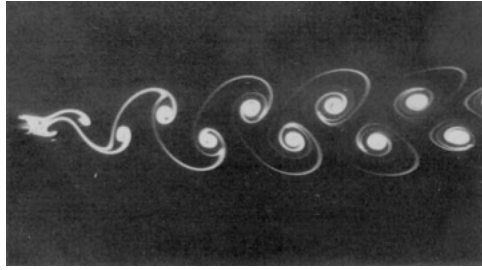


FIGURE 1.9 – Allée de Von karman pour un nombre de Reynolds de 105 [Van Dyke, 1982]

La fréquence f de détachement des tourbillons peut alors se calculer avec la formule suivante :

$$f = \frac{u_\infty}{D} g\left(\frac{u_\infty D}{\nu}\right) \quad (1.13)$$

Avec D , une dimension caractéristique de l'obstacle ;

la vitesse u_∞ de l'écoulement loin de l'obstacle ;

la masse spécifique ρ du fluide et ν sa viscosité cinématique. Le contrôle de la fréquence de ces tourbillons est donc important car il permet d'éviter de fausser les résultats des expérimentations comportementales.

Taille limite des éléments dans le tunnel

Dans le cas du tunnel de vol du CIRAD la vitesse de consigne souhaitée est de 0,3m/s. La taille des limites des éléments pour ne pas dépasser un nombre de Reynolds supérieur à 100 est renseigné à l'aide du calcul suivant :

$$Re < 100 \quad (1.14)$$

$$\frac{u D}{\nu} < 100 \quad (1.15)$$

$$D < \frac{100 \nu}{u} \quad (1.16)$$

$$D < \frac{100 \times 15,6 \cdot 10^{-6}}{0,3} \quad (1.17)$$

le diamètre maximale des éléments pour ne pas dépasser un nombre de Reynolds de 100 est de :

$$D < 5\text{mm} \quad (1.18)$$

1.3.7 Dispositifs d'atténuation

La chambre de mélange

La chambre de mélange est un des éléments qui se retrouve dans plusieurs expérimentations dans l'amortissement de la turbulence.

En 1979 [Cardé et Hagaman, 1979] propose une chambre de mélange (lettre (d) sur la figure 1.10) en entrée du tunnel pour amortir la turbulence créée par le mouvement de rotation des pales du ventilateur et de réguler le débit de l'air dans le tunnel de vol. Celle-ci est composée de plusieurs couches d'un étroit filtre en tissu. Ce filtre en tissu est positionné pour uniformiser et laminariser l'écoulement (cf. section 1.3.7).

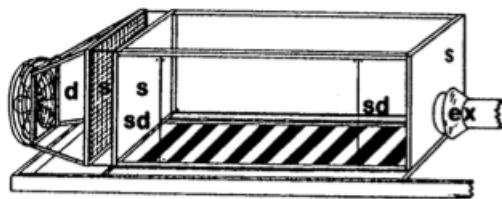


FIGURE 1.10 – Représentation d'une chambre de mélange (d) [Cardé et Hagaman, 1979]

Miller dans ses expérimentations [Miller et Roelofs, 1978] a positionné en entrée du tunnel une chambre comme atténuateur de turbulence. Celle-ci est réalisée en contreplaqué ouvert de chaque côté et de la même forme que le tunnel et de dimensions $(1,1 \times 1,2 \times 0,22\text{m})$.

Le cône de contraction

Le cône de contraction (figure 1.11) permet l'augmentation de la vitesse d'écoulement. Sur la figure 1.11 on peut voir que l'air traverse la contraction débit constant Q_v . La surface de sortie S2 étant plus petite que la surface S1 on a une augmentation de la vitesse d'écoulement selon le principe de Bernoulli. La vitesse U_2 est donc plus grande que la vitesse U_1 . De plus, cette méthode permet de diminuer les fluctuations de vitesse selon l'axe longitudinale et donc de réduire la turbulence. Cette méthode est répandue dans les expérimentations sur les tunnels de vol.

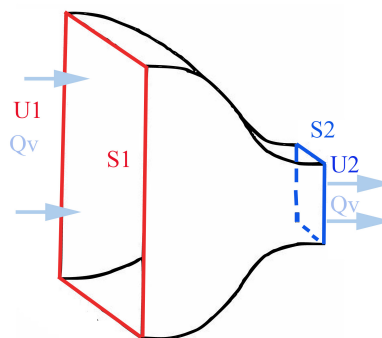


FIGURE 1.11 – Module de rétrécissement pour tunnel de vol

En entomologie Visser [Visser, 1976] utilise ce procédé dans ses expérimentations. Il décrit ce procédé comme un moyen de réduire la turbulence dans la direction principale de l'écoulement.

Les structures en « nids d'abeilles »

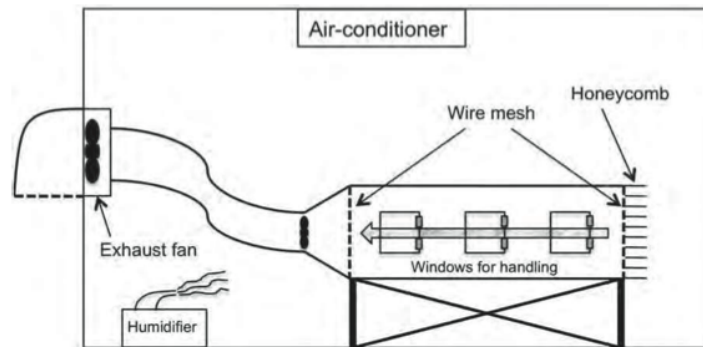


FIGURE 1.12 – Position de la structure en nid d'abeille dans un tunnel de vol [Kainoh, 2011]

Dans un souci de rendre la structure de l'écoulement laminaire, l'utilisation d'une structure en nid d'abeilles est recommandée. Cette structure étant relativement onéreuse, [Kainoh, 2011] propose l'utilisation de petits tubes en plastique de diamètre allant de 3 à 5 cm et de longueur variant entre 10 et 15 cm (figure 1.13) pour remplacer la structure alvéolaire. Cette structure est positionnée en entrée de la section d'essais. Le rôle de ce système est de supprimer les grandes structures tourbillonnaires. Cependant, des tubes dont la longueur serait trop importante entrainerait une diminution de la pression [Manshadi, 2011].

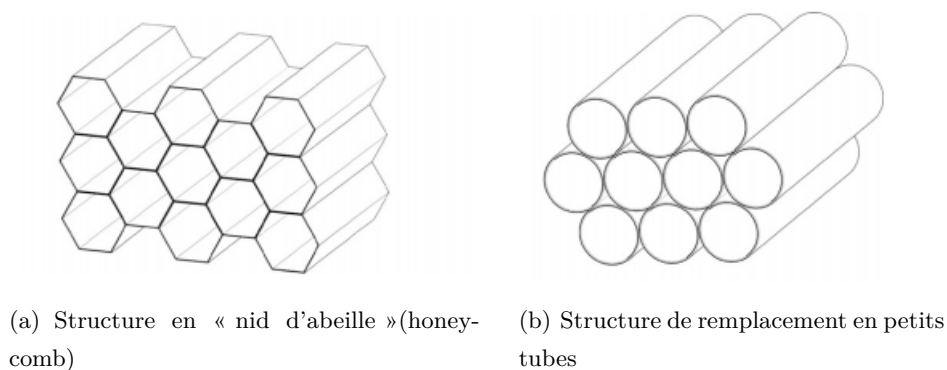


FIGURE 1.13 – Remplacement de la structure en nid d'abeille (a) par des petits tubes (b) dans un tunnel de vol [Kainoh, 2011]

Les filtres

En sortie de chambre de mélange ou après un cône de contraction, on retrouve souvent des filtres ou des tissus pouvant atténuer la turbulence, c'est le cas pour les expérimentations de [Aluja *et al.*, 1993], de [Visser, 1976], de [Miller et Roelofs, 1978], ou encore de [Cardé et Hagaman, 1979]. Miller [Miller et Roelofs, 1978] lui utilise des filtres de type « gaze » en entrée du tunnel de vol, ce

qui permet selon lui de réguler le régime de l'écoulement. Ces filtres peuvent aussi être fabriqués à partir de fils très fins [Aluja *et al.*, 1993], ou en soie [Miller et Roelofs, 1978]. Les filtres sont utilisés pour égaliser la variation de la vitesse d'écoulement dans la section d'expérimentation du tunnel de vol. De plus, ils peuvent aussi enlever de fines structures tourbillonnaires. Les filtres ou les tissus sont utilisés dans le but de réduire les écarts de vitesse d'air et de laisser passer un profil d'air régulier. Visser [Visser, 1976] montre l'efficacité de ces filtres en effectuant des mesures en sortie du filtre à charbon actif¹ ; il a alors remarqué qu'il se formait des structures tourbillonnaires dues au pliage et à la perforation de la plaque de métal. Ce fort taux de turbulence décroît après passage dans les 4 filtres et dans la zone contractée prévue à cet effet (figure 1.2).

Les filtres rendent les profils de vitesse d'écoulement plus uniforme, en imposant une chute de pression statique proportionnel à la vitesse d'écoulement au carré. Les filtres permettent de réduire l'épaisseur de la couche limite et acceptent une résistance aux gradients de pression. L'évolution du coefficient de perte de charge permet d'éliminer la quasi-totalité la variation de la vitesse moyenne longitudinale. Le filtre permet également de réduire l'intensité de la turbulence dans le champ d'écoulement moyen en orientant le flux d'air vers la normale. Plus le maillage du filtre est resserré, plus il permet la réduction de la turbulence pré-existante.

1.3.8 Création volontaire de turbulence

Dans certains cas [Marsh *et al.*, 1974],[Kennedy *et al.*, 1981],[Kennedy *et al.*, 1980] cette régularité de l'écoulement est un obstacle à la création d'un panache de phéromone suffisamment large et saccadé. Des « petits becquets » sont positionnés dans le tunnel pour augmenter de façon volontaire la turbulence.

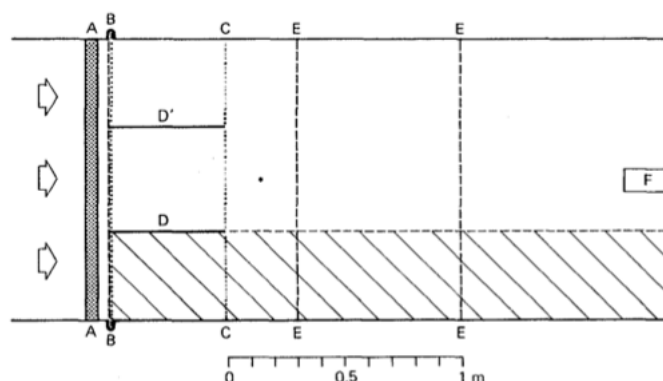


FIGURE 1.14 – Schéma du tunnel avec présence de « becquets » pour la création de turbulence

Le tunnel de vol utilisé (figure 1.14) est un tunnel qui combine à la fois l'utilisation du régime turbulent et du régime laminaire. Les « becquets » sont disposés dans un couloir latéral (hachure sur la figure 1.14). Ceux-ci sont disposés sous forme de bandes que l'on abaisse pour créer de la turbulence et un panache uniforme de phéromones. Sur chacun de ces « becquets » est fixé une pastille de phéromones pour augmenter leur concentration dans l'air du tunnel. L'air passe ensuite au travers

1. Filtre qui permet la fixation des molécules polluantes sur le charbon et d'assainir l'air.

d'un filtre de nylon pour être de nouveau laminarisé. [Marsh *et al.*, 1974],[Kennedy *et al.*, 1981],[Kennedy *et al.*, utilisent donc la turbulence pour densifier et uniformiser leur nuage de phéromones mais le régime laminaire est tout de même utilisé dans la partie avale pour les études comportementales.

1.4 Récapitulatif des caractéristiques techniques des tunnels de vol

Tableau 1.1 – Tableau récapitulatif des caractéristiques techniques des tunnels de vols (N.C :Non communiqué par l’auteur)

Auteurs		[Visser, 1976]	[miller,1978]	[Visser et Griepink, 1996]	[Felix, 2008]	[Marsh <i>et al.</i> , 1974]
Caractéristiques						
Paramètres géométriques	Type	Air soufflé	Air soufflé	Air soufflé (Cycle)	Soufflé/Tiré	Air soufflé
	Longueur	3,40m	2,44m	3m	1,9m	2,44m
	Largeur	0,93 et 0,3m	0,9 m	1,3m	0,8m	0,9m
	Hauteur	0,93 et 0,3m	1,22m	1,41m	0,45m	1,22m
	Filtre à turbulence	4 filtres en fils de 18 mailles	Filtre en tissu	4+2 filtres de 40 mailles en fil (Ø 0,14mm)	N.C	Filtre en nylon
	Dispositif(s) particulier(s)	cône de contraction	Chambre de mélange (Contre-plaqué)	-	Chambre de mélange	Chambre de mélange
	Diamètre soufflage	N.C	0,51	N.C	N.C	N.C
Paramètre physiques	Vitesse d’air en entrée	1m/s	0,47-0,65 m/s	0,5-2 m/s	0,6 m/s	N.C
	Régime d’écoulement	Laminaire	Laminaire	Laminaire	Laminaire	Laminaire et turbulent
	Type de mesure	N.C	Anémomètre	Anémomètre	N.C	N.C
	Contrôle de la turbulence	Nombre de Reynolds	Visuel	étude du profil vertical de vitesse	N.C	étude visuelle

1.5 Synthèse bibliographique

Cet état de l'art a mis en avant les avancées dans l'étude des tunnels de vol en entomologie. L'utilisation des tunnels de vols pour l'étude comportementale des insectes a connu ses débuts dans les années 70 sur les travaux de [Kennedy *et al.*, 1974] ou encore de [Visser, 1976]. Depuis, la plupart des études reprennent les caractéristiques de ces tunnels. La forme géométrique la plus répandue est la forme parallélépipédique. Cependant, [Felix, 2008] sort de l'ordinaire en proposant une forme hémicylindrique. L'écoulement de l'air au sein des tunnels est assuré de plusieurs façons :

- par tirage,
- par soufflage.

Le choix du type de tunnel est fait arbitrairement selon les besoins et la configuration des pièces de stockage disponible. Aucune règle précise n'existe pour le dimensionnement et l'étude comportementale des insectes en tunnel de vol. La vitesse d'air dépend principalement des insectes qui sont étudiés. Cependant, un régime laminaire est nécessaire pour ne pas compromettre les résultats des expérimentations. Les auteurs proposent différentes façons de réduire la turbulence dans les tunnels de vols :

- les filtres et tissus ;
- la chambre de mélange ;
- les structures en « nids d'abeilles » ou le réseau de tubes ;
- le cône de contraction.

L'utilisation approximative de ces systèmes est justifiée par des études visuelles ou olfactives [Miller et Roelofs, 1978] du panache de phéromones. L'étude qualitative est donc à ce jour la seule qui prédomine dans l'étude des tunnels de vols en entomologie. Il serait en effet intéressant d'apporter des éléments d'études quantitatives de façon à optimiser au mieux l'écoulement laminaire au sein du tunnel, ainsi que d'obtenir un panache de phéromones suffisamment dense dans toutes les directions de l'espace.

CHAPITRE 2

CARACTÉRISATION DU TUNNEL EXISTANT

Sommaire

2.1	Caractéristiques géométriques	19
2.2	Caractérisation des profils de vitesse	19
2.3	Synthèse la caractérisation du tunnel de vol	26
2.4	Modifications légères du Tunnel de vol	28

2.1 Caractéristiques géométriques

Le tunnel de vol du CIRAD (Figure 2.1) est un tunnel de type parallélépipédique qui a pour dimensions $2,30\text{m} \times 0,8\text{m} \times 0,8\text{m}$. Il possède à ses deux extrémités deux cônes qui permettent le passage d'une section circulaire de 36mm à une section rectangulaire de $0,8\text{m} \times 0,8\text{m}$ et réciproquement. Le tunnel possède en entrée et en sortie des assemblages de petits tuyaux de 7cm de longueur pour 2cm de diamètre.

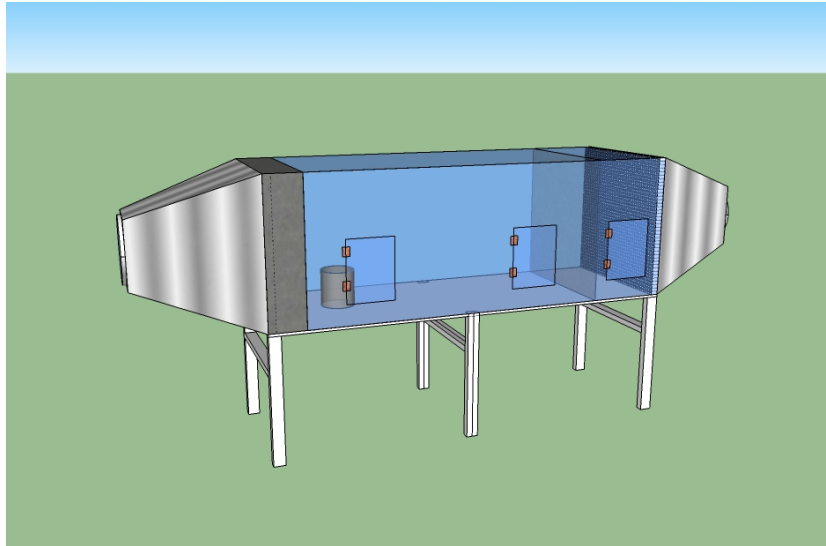


FIGURE 2.1 – Représentation en 3 dimensions du tunnel de vol

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des caractéristiques techniques du tunnel de vol :

Composant	Matériaux	Dimensions
Section de vol	Plexiglas	$2,30 \times 0,8 \times 0,8\text{m}$
Cône d'entrée	Toile galvanisée	$0,8 \times 0,8 - 0,36 \times 0,360,64\text{m}$ de long
Tuyauterie	Aluminium souple	$\phi = 0,36\text{m}$
Diamètre de soufflage		0,36m
Vitesse d'air en entrée		0,6m/s
Dispositif Particulier		Assemblage de tuyaux et filtres

Tableau 2.1 – Récapitulatif des caractéristiques du tunnel de vol du CIRAD

2.2 Caractérisation des profils de vitesse

2.2.1 Méthodologie de mesures

Pour permettre de connaître l'évolution de l'écoulement d'air dans le tunnel de vol, des mesures sont réalisées dans la section de vol. Les mesures sont réalisées à l'aide d'un thermo-anémomètre à fil chaud. Les points de mesure sont placés comme indiqué sur la figure 2.2 afin de comprendre au mieux le comportement de l'air dans la structure.

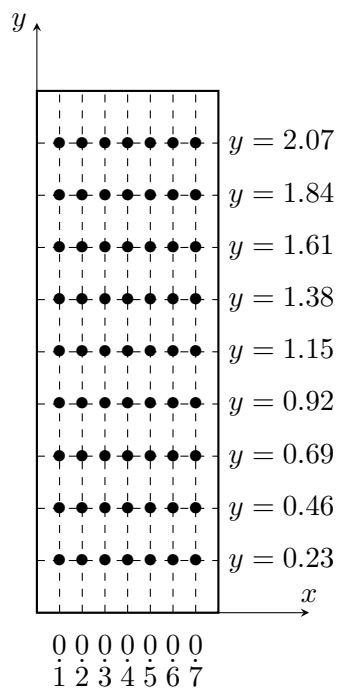


FIGURE 2.2 – Position des points de mesures dans le tunnel de vol

La section de vol est décomposée en 9 grilles de mesures de 9×7 points disposées sur la verticale tout les 10cm.

2.2.2 Études des profils de vitesse

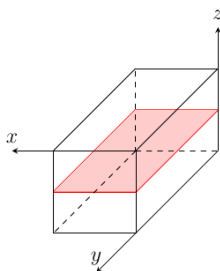


FIGURE 2.3 – Plan de symétrie vertical

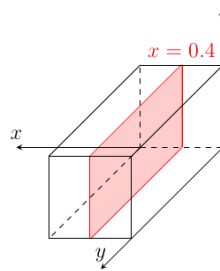
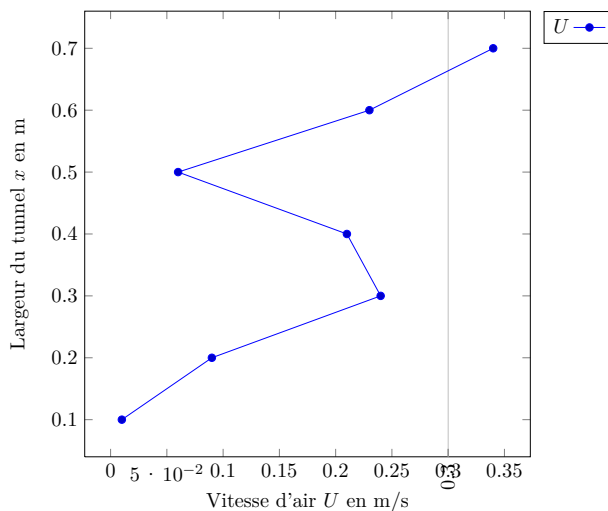
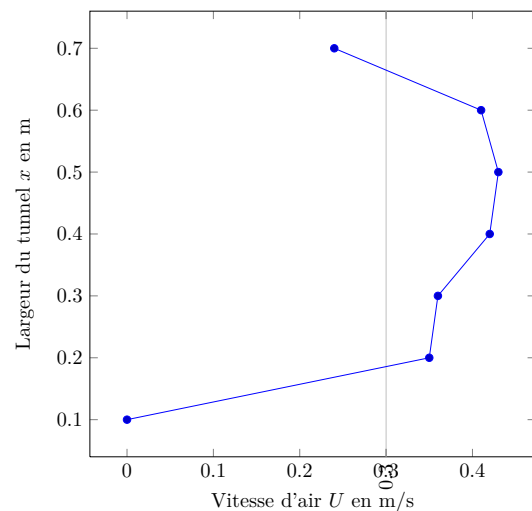


FIGURE 2.4 – Plan de symétrie horizontal

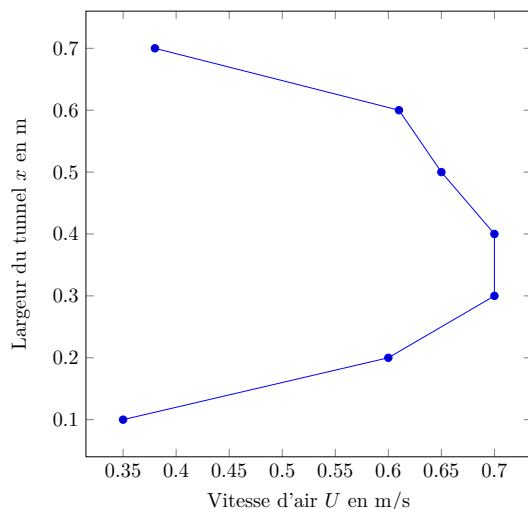
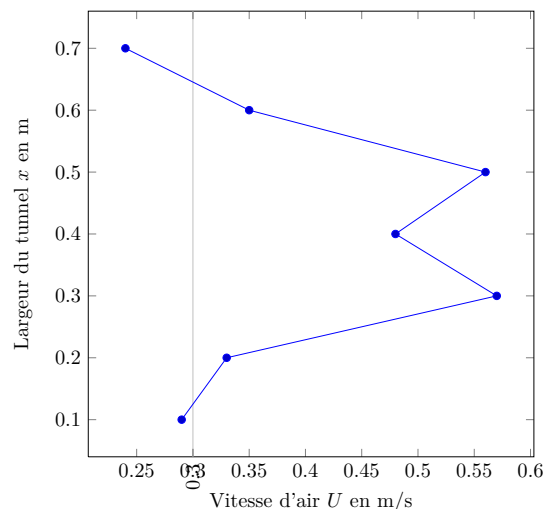
Profils horizontaux

L'étude des profils de vitesse est réalisée selon deux plans de symétrie du tunnel de vol, le plan de symétrie horizontal (Figure 2.4) et le plan de symétrie vertical selon l'axe x (Figure 2.3). Les mesures ont permis de tracer un certain nombre de profils de vitesse. Pour des raisons de concisions, seuls certains profils sont présentés ci-dessous, l'intégralité des mesures est à retrouver en Annexe A.

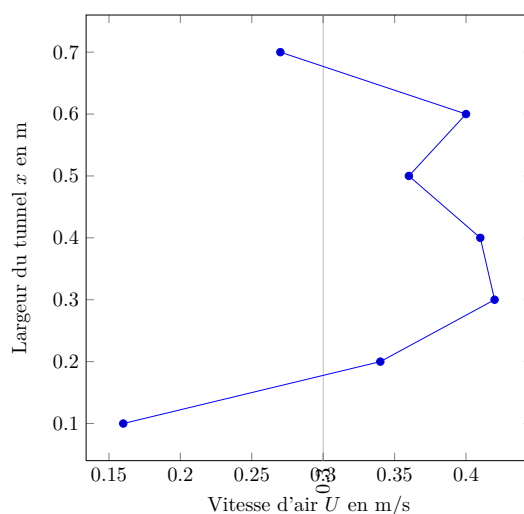
Profil horizontal d'amplitude de vitesse à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 0,23\text{m}$ FIGURE 2.5 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=0,23\text{m}$ Profil horizontal d'amplitude de vitesse à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 0,46\text{m}$ FIGURE 2.6 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=0,46\text{m}$

Les figures 2.5 et 2.6 présentent respectivement les profils de vitesse mesurés en entrée du tunnel de vol et à la sortie du filtre en nylon. En amont du filtre de nylon, le profil de vitesse d'air n'est pas régulier sur la largeur du tunnel. Il présente un minimum pour $x = 0,1\text{m}$ avec une valeur de $0,01\text{m/s}$ et un maximum d'une vitesse de $0,34\text{m/s}$ avec comme abscisse $x = 0,7\text{m}$. La vitesse souhaitée dans la zone de vol est fixée à $0,3\text{m/s}$ et celle-ci est représentée sur les graphiques par une limite rouge verticale. Le profil de vitesse présente aussi au point $x = 0,5\text{m}$ une vitesse d'air de $0,06\text{m/s}$, ce qui est bien en dessous de la vitesse attendue. Le taux de turbulence en ce point est obtenu en étudiant l'écart-type de la série de données, celui-ci est de l'ordre $0,8\%$. La turbulence n'est donc pas à l'origine de cet écart si important. Globalement, le profil d'air horizontal de la composante U_y de l'amplitude de vitesse ne correspond pas à celui d'un profil de vitesse laminaire théorique entre deux plaques.

Le premier point de mesures en aval du filtre de nylon montre qu'il n'y a pas de continuité dans les profils de vitesse; celui-ci est perturbé par la structure poreuse du nylon. La synthèse bibliographique 1 a montré que ce genre de filtres permettait une laminarisation de l'écoulement. Les résultats présentés dans le cadre de ces mesures montrent qu'ici le filtre joue son rôle et rapproche le profil de vitesse mesuré au profil théorique. On retrouve une forme parabolique avec les valeurs les plus basses aux extrémités de l'axe x , soit 0m/s à $x = 0,1\text{m}$ et $0,24\text{m/s}$ à $x = 0,7\text{m}$.

Profil horizontal d'amplitude de vitesse à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 0,92\text{m}$ FIGURE 2.7 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=0,92\text{m}$ Profil horizontal d'amplitude de vitesse à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 1,61\text{m}$ FIGURE 2.8 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=1,61\text{m}$

Le profil laminaire tend à se conserver jusqu'au point $y = 0,92\text{m}$ (figure 2.7). Cependant, la vitesse d'air augmente par rapport au point de mesures précédent. Les minimas situés aux extrémités du tunnel sur l'axe x ont pour valeurs $0,35\text{m/s}$ et $0,37\text{m/s}$. Le maximum de la vitesse est situé au sommet de la parabole au point $x = 0,3$ et $x = 0,4\text{m}$ pour une valeurs de $0,7\text{m/s}$. Au-delà du point $y = 1,38\text{m}$ le profil de vitesse commence à se dégrader. Une augmentation de la vitesse entre les points $x = 0,1\text{m}$ et $x = 0,3\text{m}$ fait passer le maximum à $0,59\text{m/s}$ et perturbe le profil de l'écoulement. Le taux de turbulence en ces deux points est respectivement de 3% et de 2% . Au point $y = 1,61\text{m}$ (figure 2.8) le profil d'amplitude de vitesse évolue différemment, celui-ci présente maintenant un profil de type « pointu », malgré un point incohérent à $x = 0,4\text{m}$. Ce type de profil pourrait être la conséquence du développement de couches limites.

Profil horizontal d'amplitude de vitesse à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 2,07\text{m}$ FIGURE 2.9 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=2,07\text{m}$

La figure 2.9 présente les mesures effectuées en sortie de zone de vol, soit à $y = 2,07\text{m}$. Le profil constaté précédemment (figure 2.8) n'a pas trouvé de continuité avec une singularité au niveau du point $x = 0,5\text{m}$ avec une vitesse d'air de $0,36\text{m/s}$. La vitesse maximum subit une diminution remarquable entre ces deux points de mesures : elle passe de $0,51\text{m/s}$ à $0,342\text{m/s}$.

Profils verticaux

Les figures 2.10 et 2.11 présentent les profils de vitesse issus des mesures réalisées dans le tunnel de vols aux points $y = 0,23\text{m}$ et $y = 0,46\text{m}$. L'étude de l'évolution du profil de vitesse entre ces deux points est intéressante car elle permet de comprendre l'effet du filtre en nylon sur l'écoulement d'air.

Profil vertical d'amplitude de vitesse à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 0,23\text{m}$

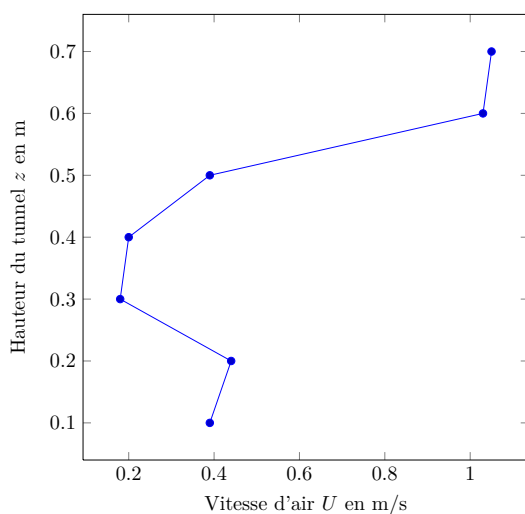


FIGURE 2.10 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,23\text{m}$

Profil vertical d'amplitude de vitesse à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 0,46\text{m}$

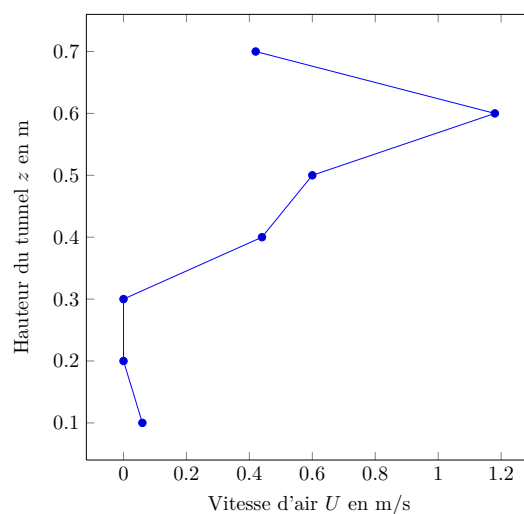
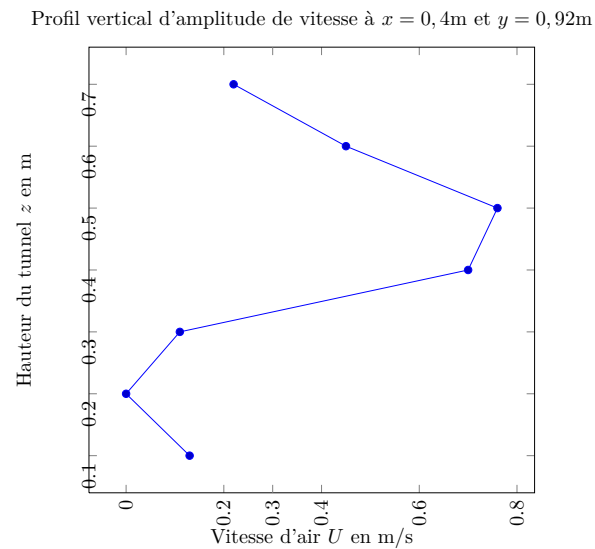
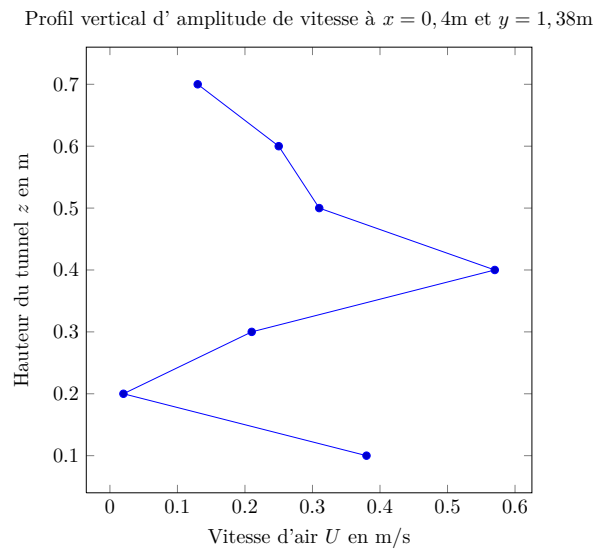
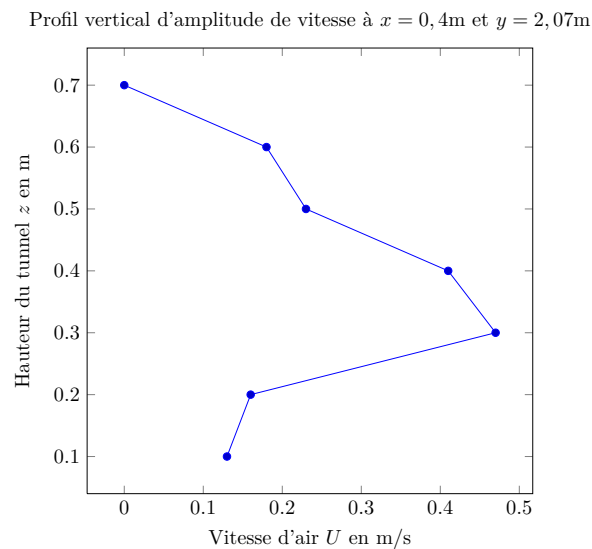


FIGURE 2.11 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,46\text{m}$

L'air pénètre en zone de vol (figure 2.10) avec un profil irrégulier. La vitesse maximale est atteinte dans la partie haute du tunnel ($z > 0,6\text{m}$) pour une vitesse de $1,15\text{m/s}$. En dessous de $z = 0,5\text{m}$ le profil de vitesse est « creux » avec des valeurs comprises entre $0,18\text{m/s}$ et $0,42\text{m/s}$. En aval du filtre de nylon (figure 2.11) le profil mesuré est « pointu » et met peut-être la conséquence d'un développement des couches limites. La vitesse au point $z = 0,7\text{m}$ chute par rapport au point de mesure précédent, elle passe de $1,15\text{m/s}$ à $0,4\text{m/s}$. Le maximum est toujours atteint pour $z = 0,6\text{m}$ pour une vitesse d'air de $1,19\text{m/s}$. Entre les ordonnées $z = 0,6\text{m}$ et $z = 0,4\text{m}$, le profil est identique à celui mesuré en amont du filtre de nylon. En dessous de $z = 0,3\text{m}$ la vitesse chute et s'annule pour les points $z = 0,3\text{m}$ et $z = 0,2\text{m}$.

FIGURE 2.12 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,92\text{m}$ FIGURE 2.13 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,38\text{m}$

A $y = 0,92\text{m}$ (figure 2.12) le profil « pointu » ne se maintient pas, la vitesse moyenne diminue et passe de $0,6\text{m/s}$ à $0,38\text{m/s}$. Le maximum est maintenant de $0,76\text{m/s}$ qui est atteint pour $z = 0,5\text{m}$. En dessous de ce point la vitesse chute et le profil est toujours creux avec des valeurs comprises entre 0m/s et $0,12\text{m/s}$. Au-delà du plan de symétrie sur l'axe y c'est-à-dire à $y = 1,38\text{m}$ (figure 2.13), le profil reprend une forme « pointue ». La vitesse moyenne continue de baisser et passe maintenant à $0,38\text{m/s}$. La position du maximum est maintenant située à $z = 0,4\text{m}$ pour une vitesse d'air de $0,56\text{m/s}$. Au dessus de ce point la chute de vitesse est toujours effective et tend vers zéro pour l'ordonnée $z = 0,2\text{m}$. A $z = 0,1\text{m}$ la vitesse d'écoulement augmente de $0,2\text{m/s}$ par rapport au point de mesure $y = 0,92\text{m}$.

FIGURE 2.14 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse U_y à $y=2,07\text{m}$

En fin de zone de vol, soit à $y = 2,07\text{m}$ le profil « pointu » est toujours présent. La tendance de la diminution de la vitesse moyenne est toujours effective. Le pic de vitesse diminue toujours sur l'axe z du tunnel et passe maintenant à $z = 0,3\text{m}$ pour une vitesse de $0,47\text{m/s}$. Comme dans les points de mesures précédents, la vitesse chute brutalement en dessous de ce maximum mais cependant la vitesse d'air n'atteint plus zéro.

2.2.3 Isocontours de vitesse

Les figures 2.15, 2.17 et 2.19 présentent les visualisations des isocontours de vitesse dans le plan xz . Les 3 plans présentés ci-dessous sont ceux ayant pour coordonnées $y = 0,23\text{m}$, $y = 1,15\text{m}$ et $y = 2,07\text{m}$.

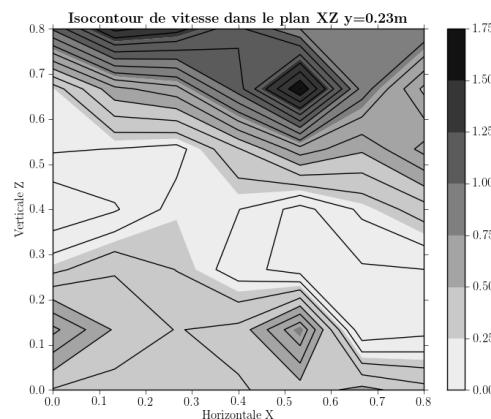
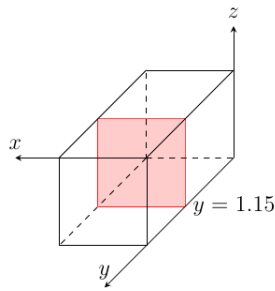
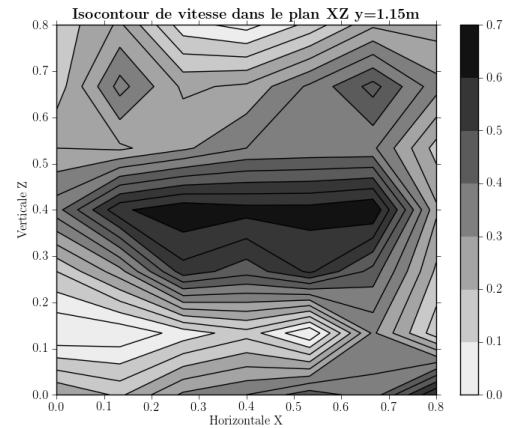
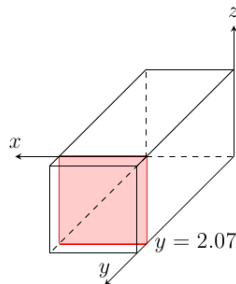
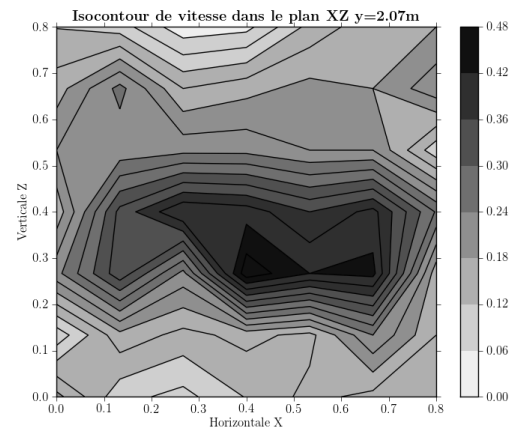


FIGURE 2.15 – Isocontours de vitesse dans le plan XZ à $y = 0,23\text{m}$

En entrée de zone de vol (figure 2.15) les isocontours permettent un rendu en deux dimensions de la répartition du champ de vitesse. La vitesse maximale est atteinte dans la partie haute du plan ($z > 0,6\text{m}$), avec des valeurs comprises entre 1 et $1,15\text{m/s}$. Une zone « creuse » est distinguable entre $z = 0,3\text{m}$ et $z = 0,6\text{m}$. Dans cette zone les valeurs de vitesse d'air varient en 0 et $0,25\text{m/s}$. La troisième zone remarquable se situe en dessous de l'axe $z = 0,3\text{m}$ et comprend des valeurs de vitesse entre $0,25$ et $0,75\text{m/s}$ avec des pics allant de $0,8\text{m/s}$ et $0,9\text{m/s}$.

FIGURE 2.16 – Position du plan XZ à $y = 1,15\text{m}$ FIGURE 2.17 – Isocontours de vitesse dans le plan XZ à $y = 1,15\text{m}$

Les figures 2.17 et 2.19 montrent que le profil de vitesse est un profil pointu selon la verticale z . Le pic de vitesse représentant le maximum de vitesse se déplace vers le bas sur l'axe z . Cela peut être le résultat direct de l'évolution de la couche limite.

FIGURE 2.18 – Position du plan XZ à $y = 2,07\text{m}$ FIGURE 2.19 – Isocontours de vitesse dans le plan XZ à $y = 2,07\text{m}$

L'évolution de la vitesse maximale et moyenne de l'écoulement se fait de façon décroissante, elle passe de $1,6\text{m/s}$ à $0,75\text{m/s}$ du point $y = 0,23\text{m}$ au point $y = 2,07\text{m}$.

2.3 Synthèse la caractérisation du tunnel de vol

Ce chapitre a présenté la caractérisation du tunnel de vol du CIRAD. Celui-ci est de forme parallélépipédique ($0,8\text{m} \times 0,8\text{m}$) et de longueur $3,58\text{m}$. Le tunnel est composé de trois parties :

- la zone de vol en plexiglas ;
- les cônes de contraction en tôle pliée galvanisée ;
- le ventilateur et la tuyauterie associée.

Une série de mesure fut réalisée au sein de la zone de vol. Cette campagne de mesure met en évidence certaines hypothèses :

- les profils de vitesse horizontaux présentent des caractéristiques proches de celles d'un profil laminaire théorique. Cependant, on peut quand même constater une discontinuité dans la forme des profils.
- Les profils de vitesse verticaux sont pointus et présentent des baisses du profil sur l'axe z . Cela peut être la conséquence directe du développement de la couche limite.

Au vu de l'analyse de ces profils et du tunnel, quelques modifications légères de la structure sont à apporter :

- Connexion hermétique de la tuyauterie au tunnel ;
- Contrôle de la régulation du tunnel et des « à coups » donnés par le ventilateur
- Centrage du tunnel par rapport au tuyaux d'entrée ;
- Installation d'un filtre ou d'un tissu secondaire ;
- Cassages des angles et réduction de la section de vol de la structure.

2.4 Modifications légères du Tunnel de vol

Cette section traite de la modification du tunnel de vol, il y sera abordés les différents changements apportés sur la structure ainsi que les résultats associés.

2.4.1 Ajout d'un filtre amortisseur de turbulence

Le premier choix de modification de la structure du tunnel provient de l'étude bibliographique qui a montré l'efficacité de filtres en tissu dans la réduction de l'intensité turbulente. Le filtre ajouté est un tissu en coton et il est fixé sur un cadre en bois présenté à la figure 2.20 .



FIGURE 2.20 – Filtre amortisseur de turbulence pour le tunnel de vol

Le filtre précédent est positionné en amont du filtre en nylon présent dans le tunnel. Celui-ci est placé à $y = 0,39\text{m}$. Les résultats présentés dans la section suivante 2.4.2 sont le résultat d'une nouvelle campagne de mesures .

2.4.2 Résultats et discussion

Les mesures et résultats présentés dans cette sous-partie reprennent les mêmes points de mesures (figure 2.3 et figure 2.4) que la section de l'étude des profils d'amplitude de vitesses verticaux et horizontaux.

Profils horizontaux de vitesse

Les figures 2.21 à 2.28 présentent les profils horizontaux d'amplitude de vitesse. Globalement le filtre posé réduit la vitesse d'écoulement dans le tunnel de vol. La vitesse d'air est maintenant comprise entre $0,05\text{m/s}$ et $0,4\text{m/s}$. Précédemment sans filtre amortisseur de turbulence, les valeurs

pouvaient atteindre 0,7m/s. De $y = 0,46\text{m}$ à $y = 1,15\text{m}$ les profils de vitesse sont « creux » ; ceux-ci présentent des extréma proches des parois. Les profils à $y = 0,46\text{m}$, $y = 0,92\text{m}$ et $y = 1,15\text{m}$ montrent des pics de vitesse à $x = 0,6\text{m}$.

Profil horizontal d'amplitude de vitesse à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 0,46\text{m}$ après pose du filtre

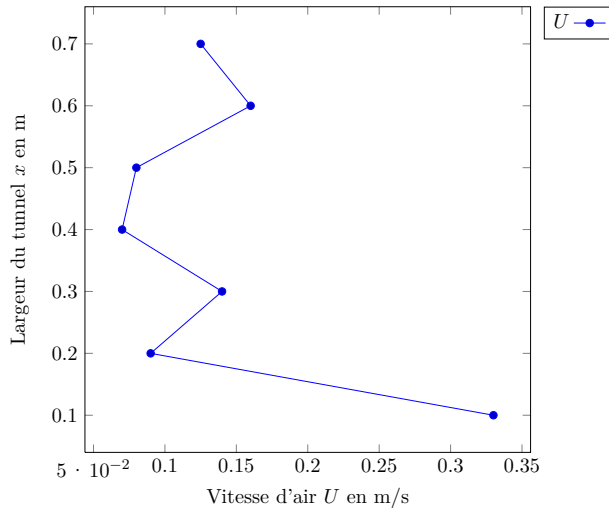


FIGURE 2.21 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=0,46\text{m}$

Profil horizontal d'amplitude de vitesse à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 0,69\text{m}$ après pose du filtre

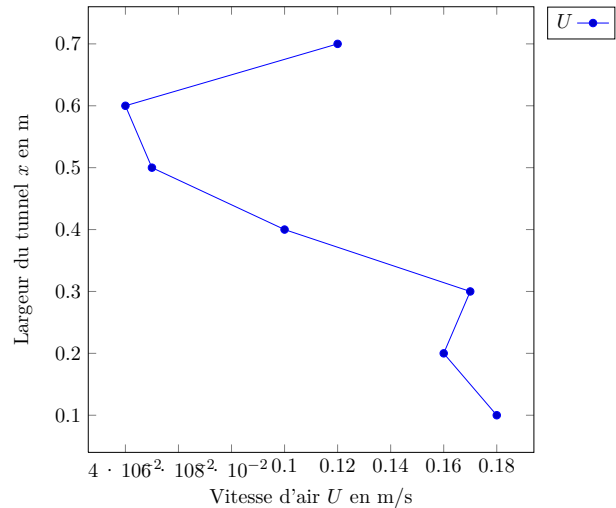


FIGURE 2.22 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=0,69\text{m}$

Au delà de $y = 1,38\text{m}$ le profil trouve une forme plus parabolique et ainsi plus proche du profil laminaire théorique. Cependant, entre $x = 0,1\text{m}$ et $x = 0,3\text{m}$ les vitesses d'air sont plus faibles.

Profil horizontal d'amplitude de vitesse à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 0,92\text{m}$ après pose du filtre

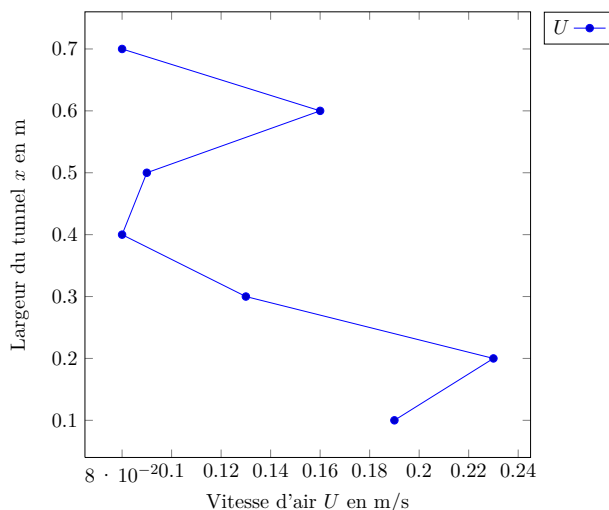


FIGURE 2.23 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=0,92\text{m}$

Profil horizontal d'amplitude de vitesse à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 1,15\text{m}$ après pose du filtre

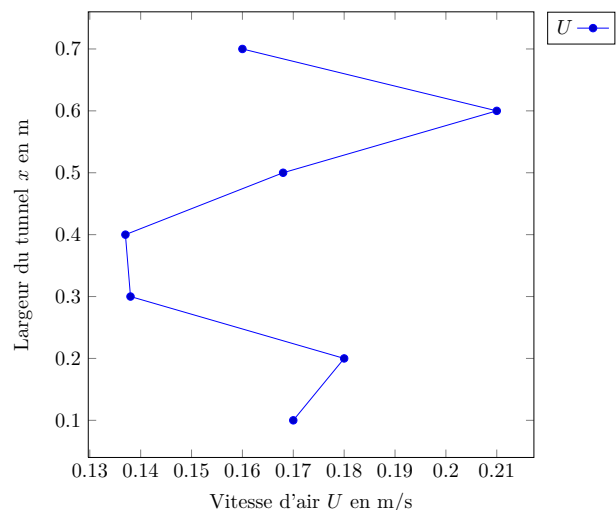
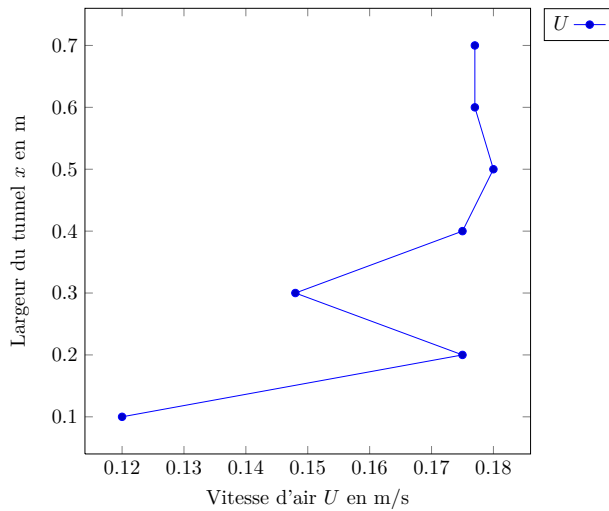
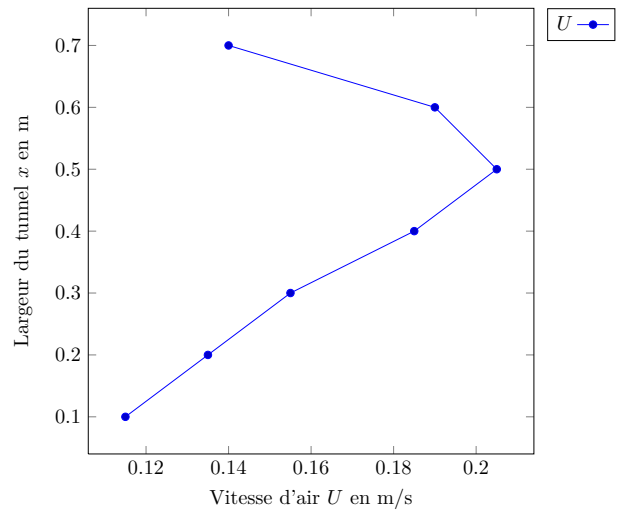
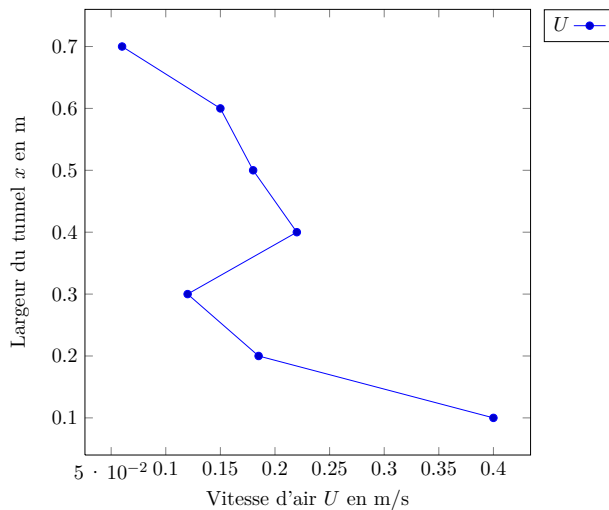
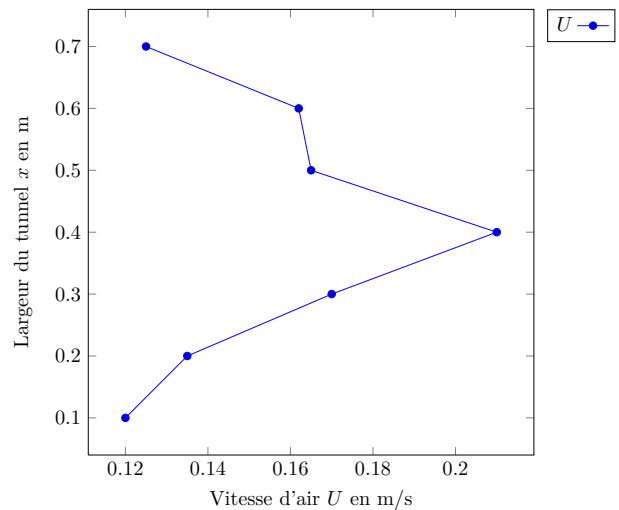


FIGURE 2.24 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=1,15\text{m}$

A $y = 1,84\text{m}$ l'air subit une accélération entre les points $x = 0\text{m}$ et $x = 0,2\text{m}$. La valeur de la vitesse y atteint 0,39m/s. Ce résultat ne semble pas très réaliste au vu de l'ensemble des résultats. L'écart-type calculé en ce point étant de 0,016 on pourrait conclure à une erreur de mesure de l'anémomètre.

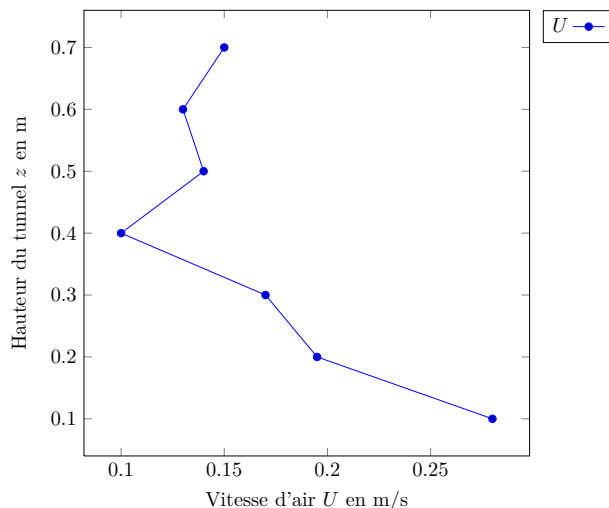
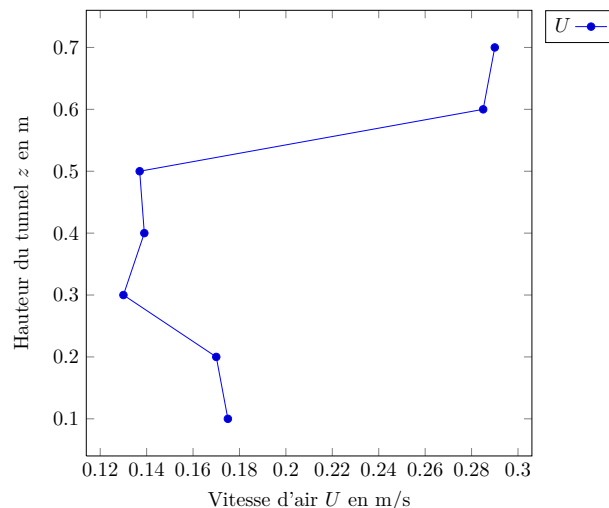
Profil horizontal d'amplitude de vitesse à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 1,38\text{m}$ après pose du filtreFIGURE 2.25 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=1,38\text{m}$ Profil horizontal d'amplitude de vitesse à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 1,61\text{m}$ après pose du filtreFIGURE 2.26 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=1,61\text{m}$

En extrémité de zone de vol(figure 2.28) le profil horizontal d'amplitude de vitesse est « pointu » avec une certaine symétrie sauf pour le point à $x = 0,5\text{m}$ où il y a une inflexion. Le régime laminaire serait alors installé en fin de zone de vol. Il y a de plus une formation des couches limites qui donnent l'aspect « pointu » du profil de vitesse d'air.

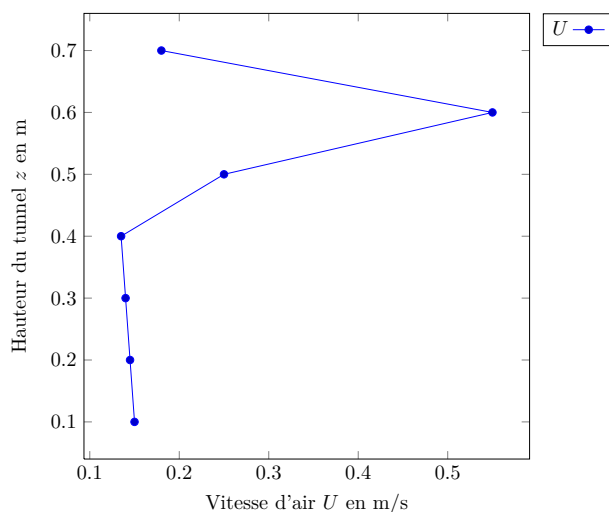
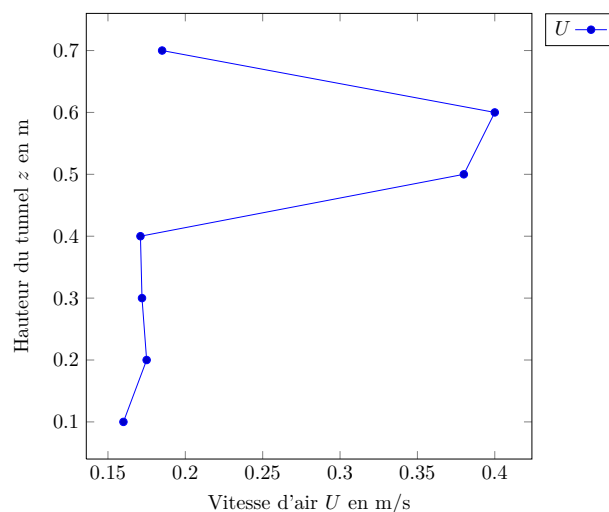
Profil horizontal d'amplitude de vitesse à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 1,84\text{m}$ après pose du filtreFIGURE 2.27 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=1,84\text{m}$ Profil horizontal d'amplitude de vitesse à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 2,07\text{m}$ après pose du filtreFIGURE 2.28 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y=2,07\text{m}$

Profils verticaux de vitesse

Les figures 2.29 à 2.36 présentent les profils verticaux réalisés dans le plan yz (figure 2.3). Chaque profil a été réalisé selon un espacement de $0,23\text{m}$ sur l'axe y .

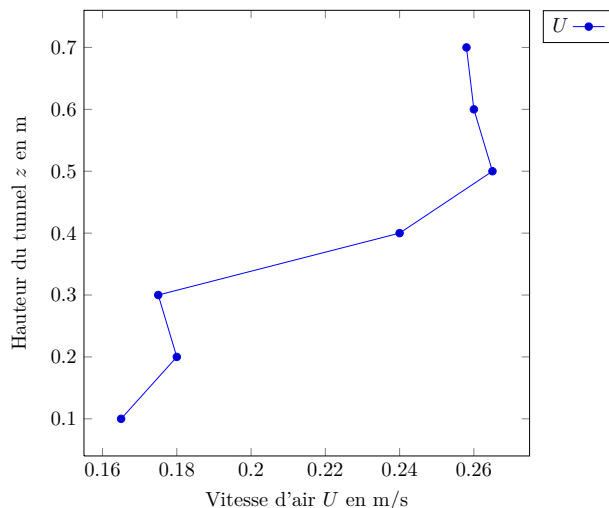
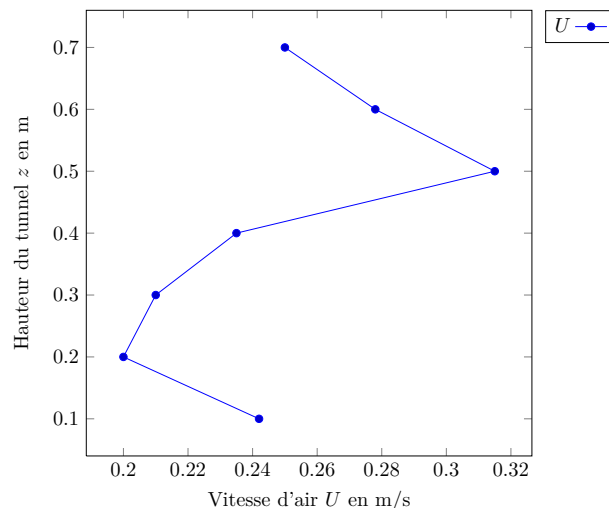
Profil vertical d'amplitude de vitesse à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 0,46\text{m}$ après pose du filtreFIGURE 2.29 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,46\text{m}$ Profil vertical d'amplitude de vitesse à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 0,69\text{m}$ après pose du filtreFIGURE 2.30 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,69\text{m}$

De $y = 0,46\text{m}$ à $y = 0,69\text{m}$ le profil « creux » est toujours visible avec respectivement des extrema sur les parois inférieures et supérieures pour les points de mesures.

Profil vertical d'amplitude de vitesse à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 0,92\text{m}$ après pose du filtreFIGURE 2.31 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,92\text{m}$ Profil vertical d'amplitude de vitesse à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 1,15\text{m}$ après pose du filtreFIGURE 2.32 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,15\text{m}$

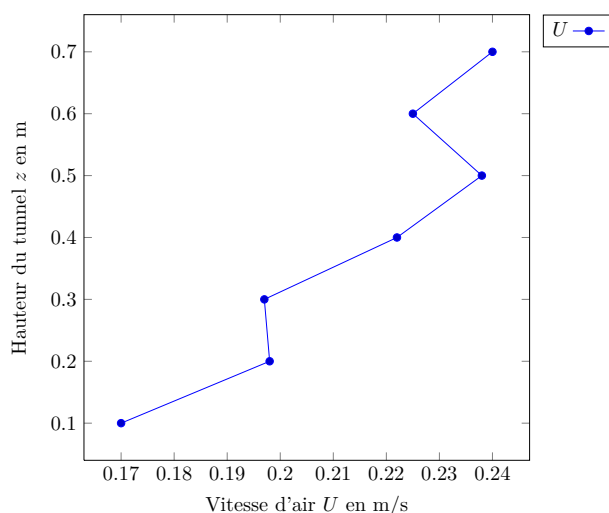
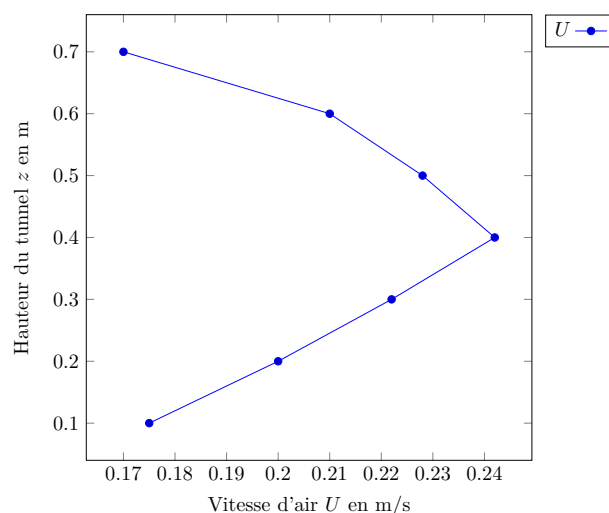
Aux points de mesures $y = 0,92\text{m}$ et $y = 1,15\text{m}$ les pics sont atteints pour $z = 0,6\text{m}$ avec une vitesse de $0,55\text{m/s}$ et de $0,4\text{m/s}$. Le profil d'amplitude de vitesse à $y = 1,15\text{m}$ présente cependant une particularité avec un deuxième point où la vitesse est élevée et dépasse la consigne à $z = 0,5\text{m}$ et atteint une vitesse de $0,39\text{m/s}$.

Au point suivant de mesure $y = 1,38\text{m}$ (figure 2.33) un changement brusque du comportement de l'air est remarquable. Le pic de vitesse disparaît, et le profil tend à prendre une forme parabolique dans la partie haute du tunnel ($z > 0,4\text{m}$). La vitesse maximale est réduite à $0,26\text{m/s}$. En dessous de $z = 0,2\text{m}$ la vitesse est plus faible et ne dépasse pas $0,18\text{m/s}$.

Profil vertical d'amplitude de vitesse à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 1,38\text{m}$ après pose du filtreFIGURE 2.33 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,38\text{m}$ Profil vertical d'amplitude de vitesse à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 1,61\text{m}$ après pose du filtreFIGURE 2.34 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,61\text{m}$

Au niveau de la zone de dépôt des insectes dans le tunnel soit à $y = 1,61\text{m}$ (figure 2.34) il n'y a pas de continuité dans ce profil arrondi. Le profil évolue de nouveau comme au point de mesures $y = 0,92\text{m}$ et $y = 0,92\text{m}$ (figure 2.31 et 2.32) c'est-à-dire en pointe. La vitesse d'écoulement augmente de nouveau et dépasse légèrement la consigne pour atteindre une vitesse de $0,31\text{m/s}$ pour le point $z = 0,5\text{m}$. En dessous de $z = 0,4\text{m}$ le profil est « creux » avec un minimum à $z = 0,2\text{m}$ pour $0,2\text{m/s}$.

A $y = 1,84\text{m}$ la discontinuité du profil de vitesse évolue encore cette fois-ci. L'amplitude de vitesse augmente avec l'altitude z dans le tunnel. Celle-ci passe d'une valeur de $0,17\text{m/s}$ pour $z = 0,1\text{m}$ à $0,21\text{m/s}$ pour $z = 0,7\text{m}$. L'écart entre ces deux valeurs reste pourtant relativement faible.

Profil vertical d'amplitude de vitesse à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 1,84\text{m}$ après pose du filtreFIGURE 2.35 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,84\text{m}$ Profil vertical d'amplitude de vitesse à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 2,07\text{m}$ après pose du filtreFIGURE 2.36 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=2,07\text{m}$

En sortie de zone de vol (figure 2.36), il y a de nouveau apparition du profil pointu, cette fois-ci celui-ci est atténué et on remarque alors une symétrie axiale par rapport au point $z = 0,4\text{m}$. Ce genre de profil de vitesse est typique des profils laminaires théoriques. Le maximum de $0,24\text{m/s}$ est situé à $z = 0,4\text{m}$ et les minima sont situés sur les extrémités avec $0,17\text{m/s}$. Le profil reste toutefois pointu ce qui pourrait être la conséquence de la présence des couches limites.

Synthèse des résultats après ajout d'un filtre amortisseur de turbulences

L'ensemble de ces résultats montre que le filtre posé permet de réduire la turbulence au sein du tunnel et de régulariser l'écoulement. La vitesse moyenne d'écoulement dans le tunnel est désormais de $0,3\text{m/s}$ bien qu'il existe un pic de vitesse à $0,55\text{m/s}$. Dans les détails, l'étude des profils verticaux a mis en évidence une translation des profils situés aux points $y = 0,46\text{m}$ et $y = 0,92\text{m}$ avant la modification aux points $y = 0,92\text{m}$ et $y = 1,15\text{m}$ après modification.

Les principales différences entre ces deux campagnes de mesures se retrouvent sur la disparition des profils très pointus qui ont laissé leur place à des profils plus proche de la parabole (figure 2.33, figure 2.35 2.36). Ceci met en avant le fait que le tissu mis en place a permis une réduction du développement des couches limites au niveau des parois.

L'interprétation des résultats obtenus ci-dessus montre le pouvoir de réduction du développement des couches limites. Afin de confirmer ces résultats et de comprendre l'effet du filtre sur la turbulence dans le tunnel, il est intéressant d'étudier l'écart-type des mesures. Pour se faire, une étude sur deux points de mesures a été réalisée. Ces points ont été choisis de par leurs positions proches des parois. Le premier point a été pris dans les profils horizontaux et le second dans les profils verticaux. Les figures 2.37 et 2.38 présentent les comparaisons d'écart-types aux coordonnées respectives de mesures :

- $y = 1,84\text{m}$ $z = 0,4\text{m}$ $x = 0,1\text{m}$ pour le profil horizontal
- $x = 0,4\text{m}$ $y = 0,69\text{m}$ $z = 0,6\text{m}$ pour le profil vertical

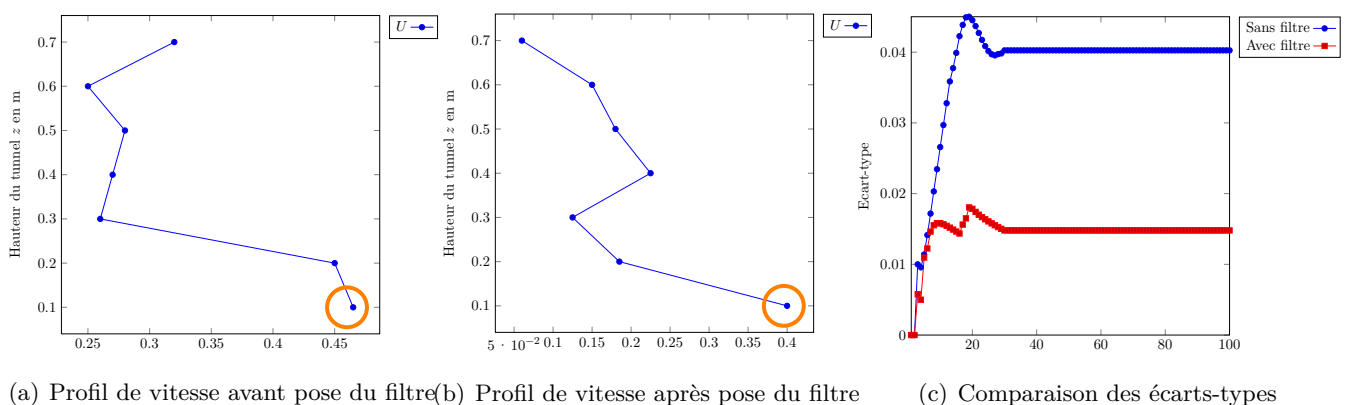


FIGURE 2.37 – Comparaison de l'écart-type au point de mesure $y=1,84$ $x=0,4$ $z=0,1$

Les figures 2.37 (a) et (b) montrent l'influence du filtre sur la vitesse d'écoulement. La vitesse en figure (a) est située principalement entre $0,25\text{m/s}$ et $0,23\text{m/s}$ pour les points situés au-delà de l'ordonnée $x = 0,3\text{m}$. En figure (c) la diminution de la vitesse d'écoulement est visible. 90% des

points sont désormais en dessous de 0,25m/s. Le seul point pour lequel il y a une vitesse élevée au dessus de la consigne de 0,3m/s est celui situé à l'abscisse $x = 0,1\text{m}$. Il faut alors étudier l'écart-type des mesures de ce point pour caractériser l'intensité de la turbulence. La figure 2.37 (c) montre bien une diminution de l'écart-type entre les deux configurations du tunnel de vol. Avant modification la valeur de l'écart-type est de l'ordre de 4% et lorsque le filtre est installé celle-ci diminue à 1,5%, soit une diminution de 2,5%.

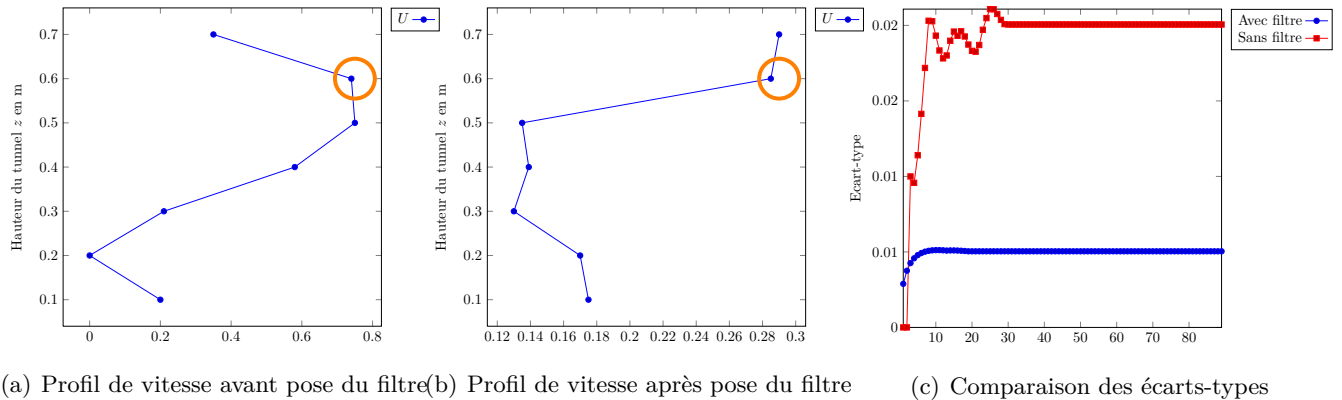


FIGURE 2.38 – Comparaison de l'écart-type au point de mesure $y=0,69$ $z=0,6$ $x=0,4$

Les figures 2.38 (a) et (b) montrent elles aussi l'influence du filtre sur la vitesse d'écoulement. Un changement dans la forme du profil est apparent avec une moyenne de 0,39m/s avant modification et de 0,23m/s après ajout du filtre. La figure 2.38 (c) confirme l'influence du tissu sur la structure de l'écoulement et sur l'intensité turbulente. L'écart-type passe de 2% à 0,5%.

Les résultats constatés après ajout du filtre en tissu confirment son intérêt dans la réduction de la turbulence. Néanmoins le profil de vitesse reste toujours élevé dans la partie haute du tunnel. Il serait intéressant de d'ajouter un autre filtre de tissu, pour voir si ce dernier permet de réduire le pic en partie haute du tunnel de vol.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE PHYSIQUE ET NUMÉRIQUE DU PROBLÈME

Sommaire

3.1	Géométrie du domaine de calcul	36
3.2	Maillage du domaine	37
3.3	Conditions aux limites	37
3.4	Modèle de turbulence et modèle de porosité	39
3.5	Discrétisation des équations et mise en œuvre numérique	42
3.6	Suivi et contrôle des résultats	42
3.7	Résultats et discussions	44
3.8	Comparaison des résultats numériques et expérimentaux	54
3.9	Bilan	58

La première étape dans la démarche d'optimisation numérique du tunnel de vol, consiste à transcrire le problème physique en une modélisation numérique. Le code de calcul choisi pour les simulations sera OpenFOAM puisqu'il est open-source et qu'il est utilisé par le laboratoire PIMENT. L'objet de ce chapitre est de montrer les différentes étapes de modélisation du tunnel de vol. Le chapitre 3 présente tout d'abord la création de la géométrie représentative du tunnel, puis la construction d'un maillage et enfin la mise en œuvre numérique passant par la discrétisation des équations de conservations ainsi que les schémas numériques associés. Enfin la sous-section 3.4 présentera les modèles de turbulences et de porosités utilisés.

3.1 Géométrie du domaine de calcul

3.1.1 Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier le problème et d'approximer un résultat grâce à la puissance de calcul de l'ordinateur une hypothèse de travail est posée. Seules les parties « actives » du tunnel seront modélisées. La tuyauterie ne sera pas prise en compte, les conditions limites seront posés en entrée du diffuseur et en sortie du cône de contraction.

3.1.2 Composition par blocs de la géométrie

La section du tunnel de vol prise en compte est celle représentée par la figure 3.1.

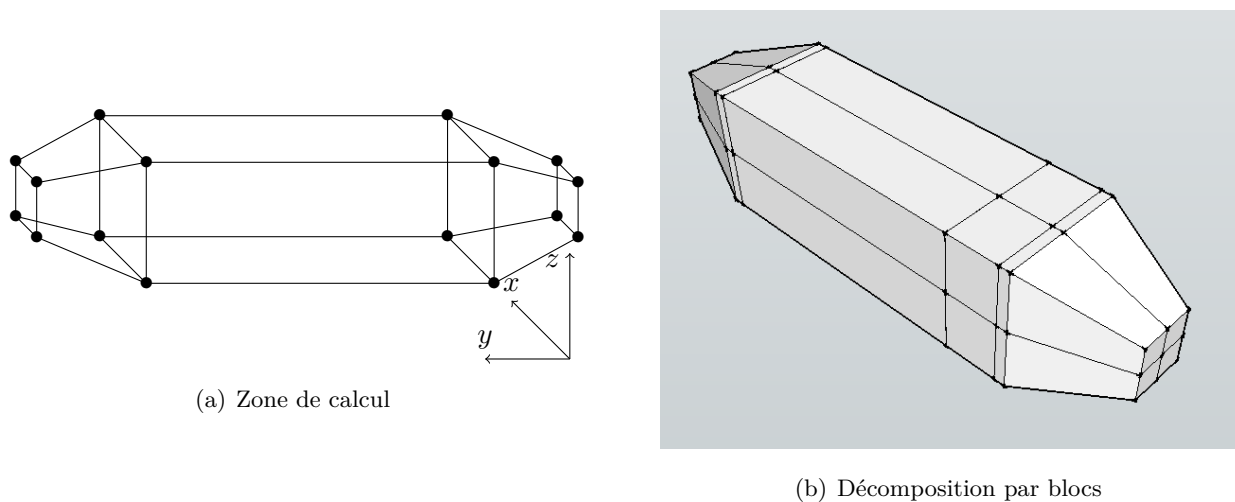


FIGURE 3.1 – Décomposition par blocs du domaine de simulation

La zone considérée prend en compte le diffuseur en entrée et les deux structures de petits tuyaux. Ces dernières de longueur de 7cm de long sont situées en entrée et en sortie de zone de vol ainsi que les deux filtres en nylons. Le domaine de simulation est décomposé en 32 blocs pour assurer la continuité du maillage et réduire les erreurs numériques. Pour réaliser un maillage de type « couche limite » au niveau des parois supérieures et inférieures, le domaine de calcul est découpé en 4 blocs dans le plan (xz) . Sur l'axe y le domaine de simulation est découpé en 8 volumes. Les

zones poreuses (petits tuyaux, filtres) possèdent leurs propres blocs afin d'y associer une porosité dont les détails seront précisés à la sous-section 3.4.2.

3.2 Maillage du domaine

Le maillage est un élément des plus important lors de simulations numériques, car il va directement influencer sur le résultat ou encore sur la convergence du calcul. Pour qu'un maillage soit bon il doit être indépendant du résultat, c'est-à-dire que le résultat n'évoluera plus si le nombre de cellules augmente. La partie qui présente ces résultats d'indépendance maillage-solution sera présentée dans le chapitre suivant. Le maillage présenté ci-dessous (Figure 3.2) est un maillage composé de 426 780 cellules. Lors de sa création le maillage doit être raffiné au niveau des zones de forts gradients. Dans le cas du tunnel de vol, les zones de forts gradients sont proches des parois et au niveau des filtres. Le maillage au niveau des parois est donc raffiné avec l'utilisation du coefficient d'expansion des cellules. Un maillage de type « couche limite » est alors créé.

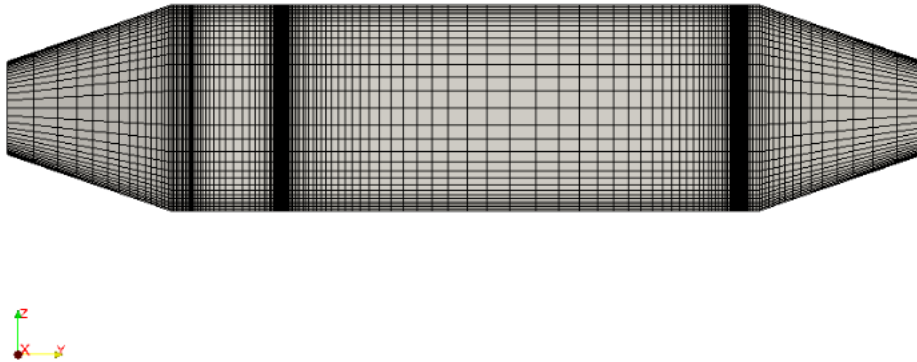


FIGURE 3.2 – Maillage du domaine de simulation vue dans le plan yz

3.3 Conditions aux limites

Conditions en entrée du domaine

La condition limite en vitesse à l'entrée du domaine est imposée de la façon suivante selon deux conditions :

- si le débit volumique est entrant $Q_{ve} < 0$ alors on a un gradient nul $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$
- si le débit volumique est sortant $Q_{ve} > 0$ on a alors une vitesse nul $u = 0$

. De plus la condition limite en pression est laissée libre avec un gradient nul $\frac{\partial P}{\partial x} = 0$. Les paramètres de la turbulence sont calculés de la sorte :

- *l'énergie turbulente* :

$$k = \frac{3}{2} \times (\bar{U} \times I)^2 \quad (3.1)$$

Où \bar{U} est la vitesse moyenne de l'écoulement. L'hypothèse posée est que la turbulence est homogène et isotrope au sein du tunnel de vol : on a ainsi I l'intensité turbulente. Cette valeur qui est de 2% a été déterminée suite aux résultats expérimentaux du chapitre 2.

– *Le taux de dissipation de l'énergie turbulente :*

$$\varepsilon = C_\mu \times \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (3.2)$$

Où C_μ est la constante de turbulence, ici elle vaut 0,09 et l est la longueur d'échelle turbulente.

Conditions en sortie du domaine

En ce qui concerne la sortie du domaine, les conditions pour un tunnel de vol en aspiration sont les suivantes : la condition limite en vitesse est fixée à 0,3m/s. Cette vitesse est appliquée dans la direction \vec{y} . La condition limite en pression est alors laissée libre $\nabla p = 0$, c'est à dire que la valeur est calculée avec un gradient perpendiculaire à la zone nulle en son point. Les valeurs de conditions limites d'intensité turbulente et du taux de dissipation de l'énergie turbulente sont libres avec $\nabla k = 0$ et $\nabla \varepsilon = 0$.

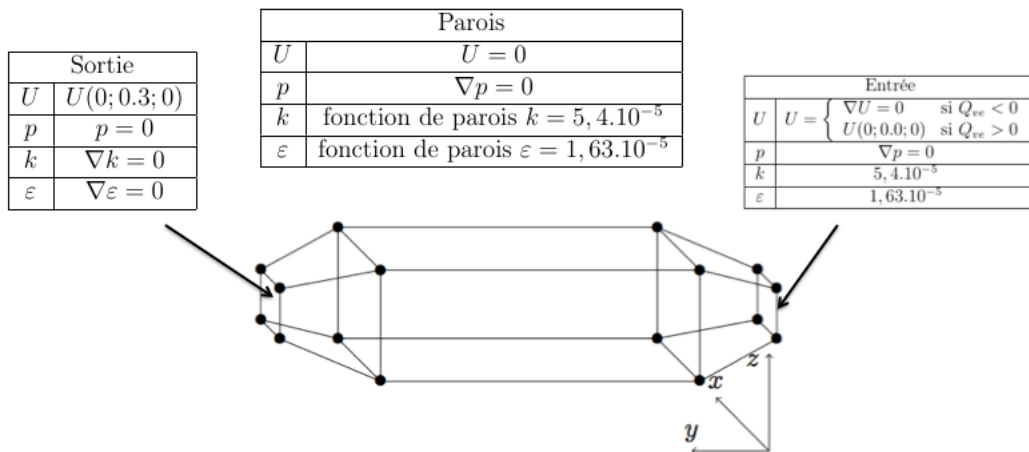


FIGURE 3.3 – Conditions aux limites des grandeurs

Conditions sur les parois

Les conditions sur les murs sont très importantes lors d'un calcul CFD, et surtout lorsque les modèles dépendent de ces valeurs, notamment pour le modèle utilisé ($k - \varepsilon$). Les conditions sont les suivantes : la condition limite en vitesse est fixée à 0, la condition limite en pression est libre, soit $\nabla p = 0$. La condition limite d'intensité turbulente est fixée avec une fonction de paroi d'OpenFOAM pour une valeur $k = 5,4 \cdot 10^{-5}$. La condition limite du taux de dissipation de la turbulence est fixée grâce à une fonction de paroi avec une valeur de $\varepsilon = 1,6 \cdot 10^{-5}$.

3.4 Modèle de turbulence et modèle de porosité

3.4.1 Modèle de turbulence

La modélisation de la turbulence consiste à représenter l'influence de la turbulence sur l'écoulement. Dans le milieu de l'industrie et dans l'ingénierie les modèles les plus utilisés sont ceux de types RANS. Cette méthode permet une approche statistique de l'influence de la turbulence sur l'écoulement moyen. Dans cette approche statistique, de nombreux modèles de turbulences existent (spallart-Almaras, $k - \varepsilon$, $k - \omega$...). Dans le cadre de l'étude sur le tunnel de vol, le modèle choisi pour les simulations est l'un des modèles de turbulence les plus courants : c'est le modèle $k - \varepsilon$. Ce modèle est robuste, économique et relativement précis. Il reste cependant à éviter dans le cas de fort gradient de pression. C'est un modèle à deux équations de transport où sont ajoutées les équations suivantes :

Pour l'énergie cinétique turbulente :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.3)$$

Pour le taux de dissipation de l'énergie turbulente

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3.4)$$

où la viscosité turbulente est représentée par :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.5)$$

La production de k est donnée par :

$$P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.6)$$

$$P_b = \mu_t S^2 \quad (3.7)$$

où S est défini comme le module moyen du tenseur de déformation :

$$S \equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (3.8)$$

et on a :

$$P_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{\text{Pr}_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3.9)$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (3.10)$$

Les constantes du modèles ont pour valeurs :

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (3.11)$$

3.4.2 Modèle de porosité

Le tunnel de vol possède des éléments que l'on considère comme des milieux poreux. Ces milieux poreux sont modélisés dans OpenFOAM en atténuant la dérivée dans le temps et en ajoutant un terme source S_i aux équations de Navier-Stokes.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + u_j \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial \tau_{ij}} \partial x_j + S_i \quad (3.12)$$

Le terme source S_i est composé de deux parties : un terme de pertes de charges visqueuses et un terme de pertes de charges inertiels. Cela provoque une chute de pression qui est proportionnelle au carré de la vitesse.

$$S_i = - \left(\mu D_{ij} + \frac{1}{2} \rho |u_{kk}| F_{ij} \right) u_i \quad (3.13)$$

Cette équation est connue sous le nom de Darcy-Forchheimer. Dans le cas d'une porosité homogène cette équation devient :

$$S_i = - \left(\mu D + \frac{1}{2} \rho |u_{jj}| F \right) u_i \quad (3.14)$$

Où D_{ij} et F_{ij} sont représentés comme les scalaires D et F .

Porosité du filtre en nylon

D'après la littérature les moustiquaires (ou filtres) provoquent une chute de pression Δp de l'écoulement. Cette chute de pression peut être calculée grâce au modèle (équation 3.15) de [Brundrett, 1993] :

$$\Delta p = 0,5 K \rho U^2 \quad (3.15)$$

Où U est la norme de la vitesse incidente, ρ la densité du fluide et K est un coefficient de perte de charge dépendant de la géométrie du problème.

Pour des nombres de Reynolds basés sur le diamètre d du fil, [Pinker et Herbert, 1967] séparent K en deux composantes dépendant de la porosité α pour l'un et du nombre de Reynolds Re pour l'autre :

$$K = G(\alpha) f(Re) \quad (3.16)$$

$$\alpha = \frac{(m-d)(n-d)}{(m n)} \quad (3.17)$$

où m et n sont les distances entre deux fils dans chacune des directions du plan.

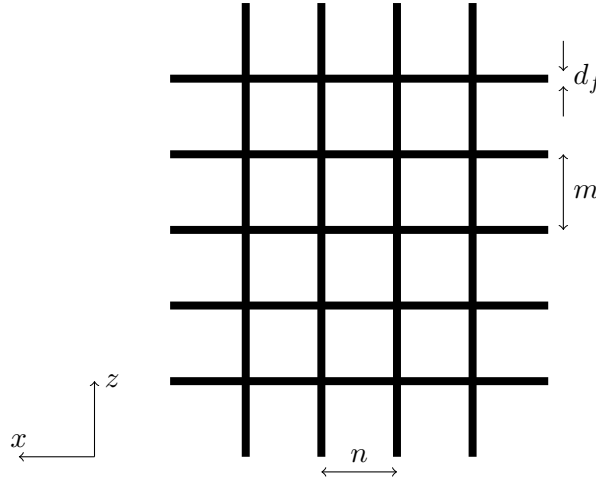


FIGURE 3.4 – Vue détaillée du filtre

La corrélation suivante a été mise au point par [Pinker et Herbert, 1967] et confirmée par les travaux de [Brundrett, 1993] :

$$G(\alpha) = \frac{(1 - \alpha^2)}{\alpha^2} \quad (3.18)$$

en 1993 [Brundrett, 1993] propose une corrélation pour $f(Re)$ pour une vitesse incidente normale à l'écran ($\theta = 0^\circ$),

$$f(Re) = \frac{7,125}{Re_d} + \frac{0,88}{\log(Re_d + 1,25)} + 0,55 \log(Re_d) \quad (3.19)$$

et la corrélation pour K_θ , dépendant de l'angle d'incidence θ de cette vitesse :

$$K_\theta = \cos^2 \theta \frac{(1 - \alpha^2)}{\alpha^2} \left[\frac{\theta_M}{\theta_{KE}} + \frac{7,125}{Re_d \cos \theta} + \frac{0,88}{\log(Re_d \cos \theta + 1,25)} + 0,55 \log(Re_d \cos \theta) \right] \quad (3.20)$$

où θ_M/θ_{KE} un terme de correction compris entre 0,964 et 0,977. Ces deux équations ne sont valides que pour des nombres de Reynolds compris entre 10^{-4} et 10^4 .

Porosité de l'assemblage de tuyaux

Au sein du tunnel de vol, en amont et en aval de la zone de vol, il y a deux assemblages de petits tuyaux. Cet assemblage est considéré comme un milieu poreux. Pour déterminer sa porosité l'utilisation de la relation suivante est utilisée :

$$\epsilon = S_{pores}/S_{totale} = 0,78 \quad (3.21)$$

La structure a donc une porosité de 78%. La vitesse d'écoulement dans le tube est résolue avec des conditions limites imposées. En posant une condition limite de symétrique $u(r) = 0$ on a alors :

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dx} (r^2 - r_0^2) \quad (3.22)$$

On sait que la vitesse d'écoulement dans un milieu poreux est donné par la relation suivante :

$$u_f = \frac{-k}{\eta} \frac{\Delta P}{L} \quad (3.23)$$

En manipulant l'expression 3.22 on à :

$$u(r) = \frac{r^2 - r_0^2}{4\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (3.24)$$

enfin par identification avec l'équation 3.23 on en déduit le coefficient K de conductivité hydraulique :

$$K = \frac{r^2 - r_0^2}{4} \quad (3.25)$$

3.5 Discrétisation des équations et mise en œuvre numérique

Les équations de transports et de conservations citées dans les sections précédentes sont résolues grâce à une méthode aux volumes finis. L'utilisation du code de calcul OpenFOAM servira d'outil pour la résolution de ces équations. Lors de la discrétisation du système d'équations de transport le choix du schéma d'interpolation définit le degré de discrétisation (ordre du schéma). Pour le cas d'étude du tunnel de vol, il a été décidé de travailler en second ordre *upwind*. Ce choix peut s'expliquer par la volonté d'obtenir une bonne précision de calcul du résultat tout en permettant une convergence rapide de la solution. Lors de l'utilisation d'un tel schéma, le maillage doit être relativement fin. La méthode *upwind* utilise des valeurs obtenues en amont de l'écoulement pour calculer les variables en aval. Le choix d'une méthode *upwind* permet donc d'obtenir de la stabilité numérique.

3.6 Suivi et contrôle des résultats

La résolution par la mécanique des fluides numériques des équations de Navier-Stokes permet d'approcher le résultat réel, mais pour se fier à ces résultats il faut pouvoir maîtriser son calcul. Dans cette démarche deux étapes permettent de vérifier que les solutions obtenues numériquement seront exploitables.

3.6.1 Etude de l'indépendance maillage/résultats

La première étape lors des simulations en CFD¹ est de chercher un maillage pour obtenir un bon rapport entre le temps de calcul et la précision des résultats. L'objectif de cette démarche permet de chercher un maillage à partir duquel, quelque soit le raffinement, les résultats n'évoluent plus. Pour effectuer cette étude d'indépendance la géométrie du tunnel étant fixée, seule la densité du maillage sur l'axe y a été modifiée. Bien que plusieurs maillages aient été testés des variations très importantes au niveau des interfaces des milieux poreux sont remarquables. Seuls 4 maillages sont retenus pour le test d'indépendance avec les caractéristiques suivantes :

1. Computational fluids dynamics

Maillages	Grossier	Standard	Fin	Très fin
Caractéristiques	$20 \times 202 \times 20$	$35 \times 347 \times 35$	$35 \times 502 \times 35$	$35 \times 520 \times 35$

Tableau 3.1 – Caractéristiques des maillages pour le test d'indépendance

Le test d'indépendance consiste en l'étude des variations de la composante U_y de la vitesse d'écoulement sur toute la longueur de l'axe y du tunnel de vol. Lors des simulations précédentes, les observations de cette vitesse ont montré que les zones les plus sensibles étaient celles dont les faces étaient reliées aux zones poreuses. La zone au niveau des filtres est la plus impactée car son épaisseur est de 1mm sur l'axe y . Les cellules adjacentes à celles du filtre ne doivent pas mesurer plus de 1,2mm pour s'assurer de la stabilité du calcul.

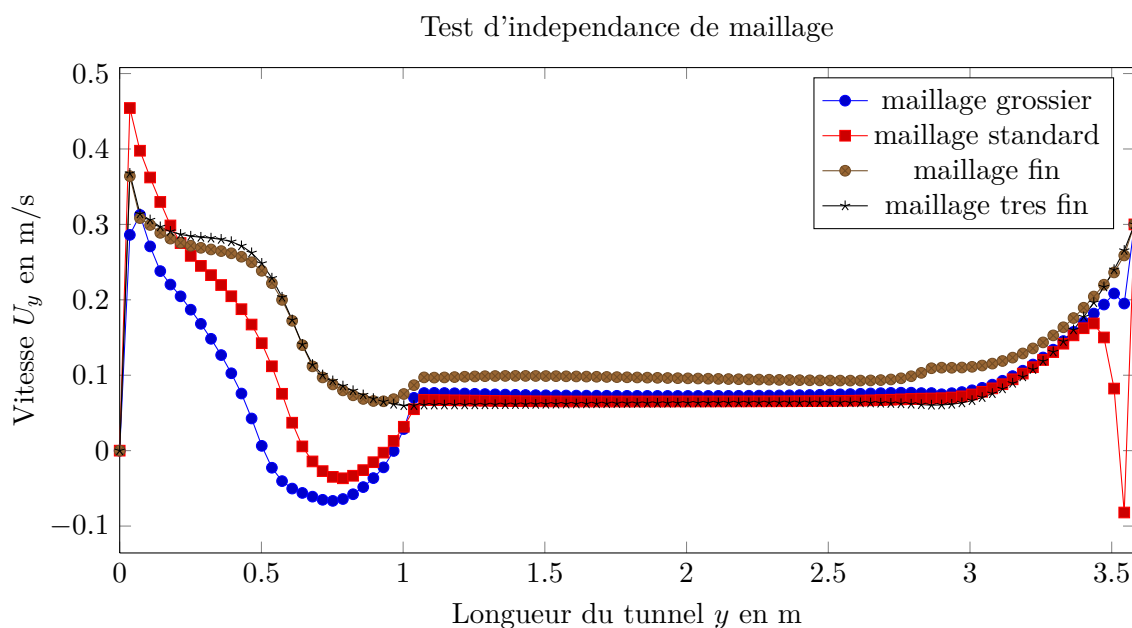


FIGURE 3.5 – Test indépendance maillage/Résultats

La figure 3.5 présente les résultats du test entre les 4 maillages. Pour ces maillages la différence entre les vitesses est la plus importante entre $y = 0$ et $y = 1$ m. L'allure de la courbe est identique mais en augmentant la densité de maillage la vitesse augmente elle aussi. La vitesse évolue de façon croissante, elle passe par des valeurs négatives qui physiquement ne sont pas réalistes, à des vitesses qui n'évoluent presque plus (aux alentours de 0,09m/s) pour les maillages fins et très fins. Au niveau de la zone de vol la vitesse d'écoulement ne change pratiquement pas pour chacun des maillages puisqu'elle reste entre 0,08 et 0,1m/s. Enfin en sortie de tunnel la vitesse évolue très peu entre les différents maillages, sauf pour le maillage standard qui est dû à un changement dans le coefficient d'expansion des cellules du maillage.

3.6.2 Etude de la convergence des résidus de calculs

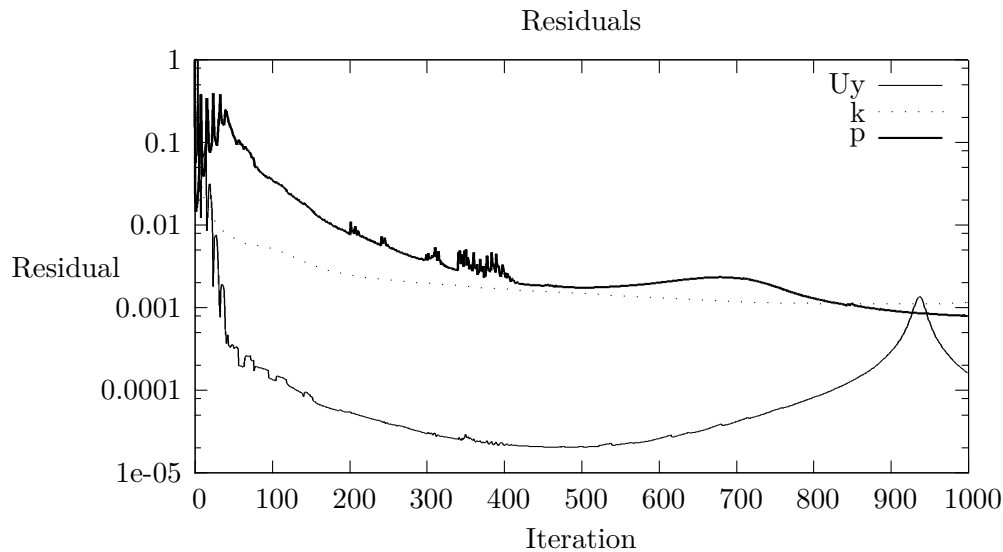


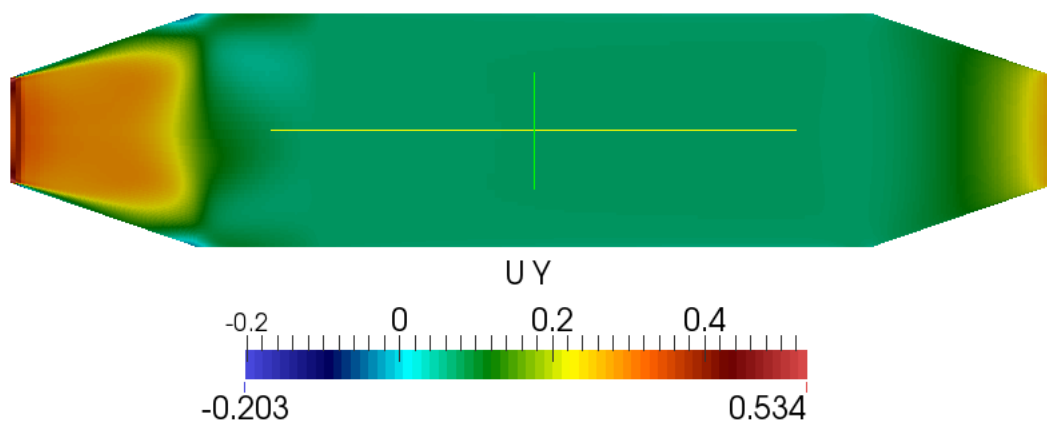
FIGURE 3.6 – Convergence des résidus de calculs

Une fois l'indépendance entre le maillage et les résultats montrés, il est important de vérifier la convergence des résidus de calculs. Les résidus rappellent le, sont les variations des grandeurs mesurées (vitesse, pression ϵ dans le cas de cette étude). Ces paramètres de convergences sont fixés dans le fichier *fvolution*. Ils sont fixés à 10^{-6} pour ϵ , p et k et à 10^{-5} pour la vitesse u . Lors de la simulation l'affichage en temps réel de l'évolution des résidus de calculs est rendu possible grâce à *gnuplot*. La convergence des résidus obtenue lors du calcul est présentée en figure 3.6.

3.7 Résultats et discussions

3.7.1 Champ de vitesse

La figure 3.18 présente le champ de vitesse horizontal du tunnel de vol du CIRAD sur le plan zy à $x = 0,4m$. Le champ de vitesse présente bien l'effet des milieux poreux (tuyaux et filtres) sur l'écoulement. La simulation numérique nous permet de confirmer les effets d'un assemblage de tuyaux et d'un filtre en nylon présenté dans l'état de l'art sur les tunnels de vol pour insectes (chapitre 1).

FIGURE 3.7 – Champ de vitesse horizontale du tunnel sur le plan zy à $x=0,4m$

L'assemblage de tuyaux restreint l'écoulement dans la direction de y , d'où le choix d'afficher uniquement le champ de vitesse horizontale. Ce caractère unidirectionnel de l'écoulement est renforcé par l'étude des lignes de courant (figure 3.8). Cette étude montre que l'écoulement d'air, en traversant la zone de tuyaux, est forcé à suivre la direction selon y .

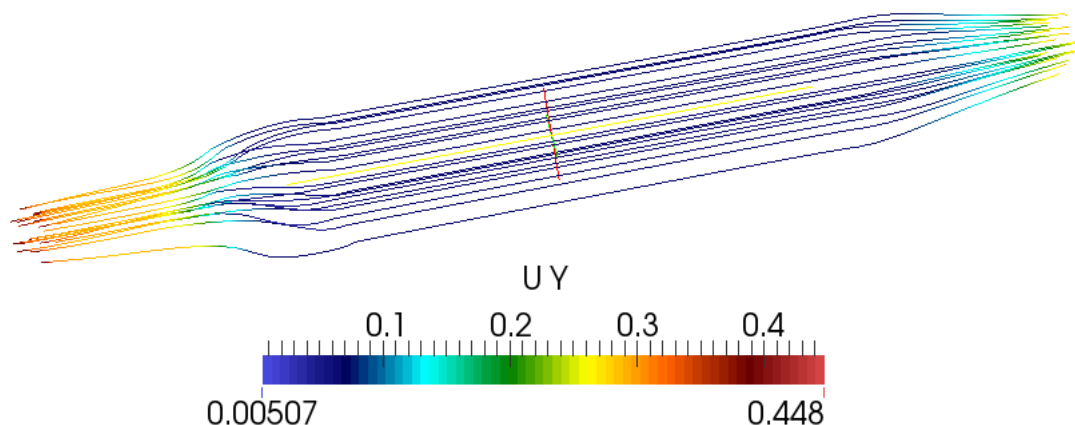


FIGURE 3.8 – Lignes de courants du tunnel de vol

Le deuxième élément apporté par la bibliographie est celui du filtre en nylon. Une fois de plus la simulation confirme la théorie qui montre son influence sur propriétés de l'écoulement. Dans le cône d'entrée la vitesse d'écoulement est de l'ordre de $0,35m/s$. Une fois passé à travers le filtre l'écoulement est « lissé », et il permet une réduction des composantes latérales U_x et U_z de la vitesse. Dans le tunnel les zones où les vitesses sont les plus importantes sont en entrée là où l'air est aspiré et en sortie là où le cône change de section. Le rétrécissement entraîne une augmentation de la vitesse d'air qui est représentée par la courbe de couleur verte qui vire au foncé puis passe dans des couleurs jaune orangées. Dans la section dite de « dépôt de pots » la vitesse d'écoulement est la plus importante (zone verte foncée) aux extrémités sur l'axe z du tunnel. La zone qui est intéressante pour les travaux du CIRAD est la zone de vol où la vitesse ne dépasse pas les $0,1m/s$.

Pour mieux comprendre les effets de ces milieux poreux il faut donc s'intéresser aux profils de vitesse.

Profil de vitesse longitudinal

Le premier type de profil étudié est celui sur la longueur du tunnel (axe y). La figure 3.9 présente la composante U_y de la vitesse sur l'axe y du tunnel. L'étude de la vitesse sur cet axe est particulièrement importante car elle va renseigner sur l'évolution et sur les valeurs de vitesse aux différents points du tunnel. Ce profil présenté en figure 3.9 est remarquable pour plusieurs raisons.

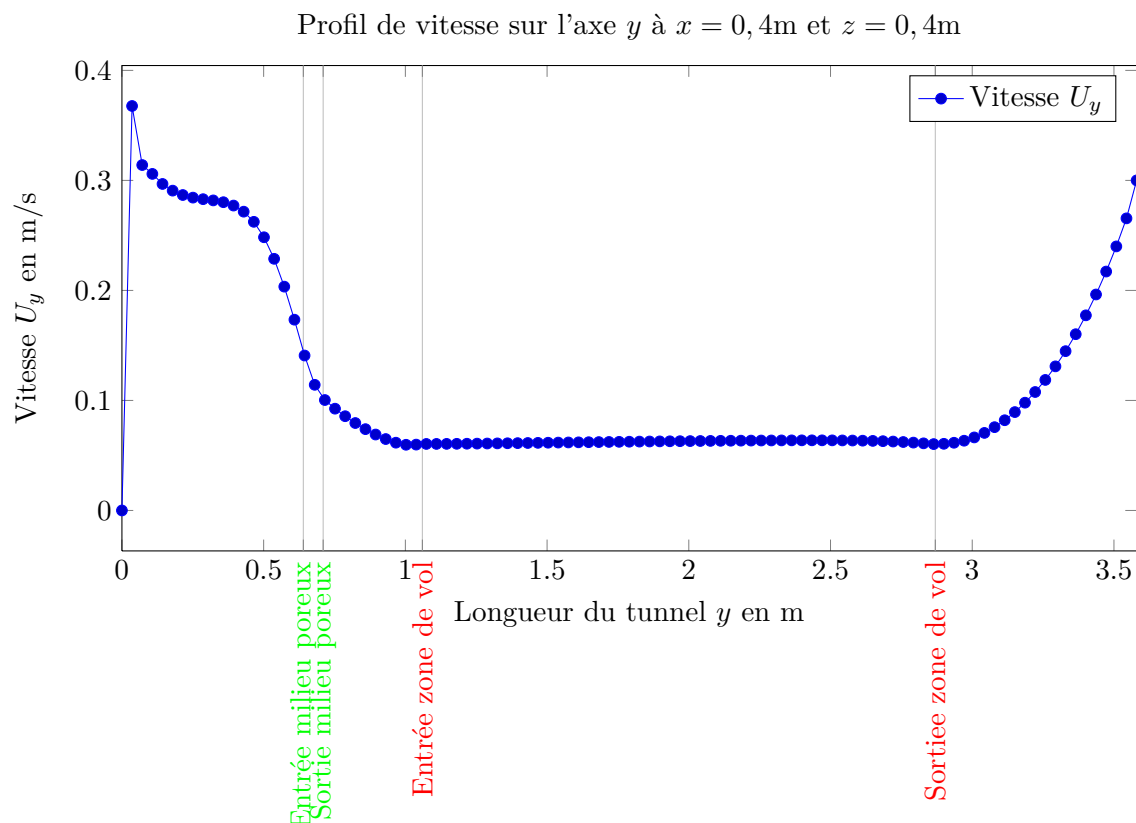


FIGURE 3.9 – Profil de vitesse sur l'axe y à $x = 0,4\text{m}$ et $z = 0,4\text{m}$

Tout d'abord il est important d'insister sur le fait que sur l'ensemble du tunnel la vitesse ne dépasse pas la consigne de $0,3\text{m/s}$. La vitesse d'air est dépassée en un point situé en entrée du tunnel mais ne concerne pas la zone de vol. La valeur prend de suite une vitesse aux alentours de $0,3\text{m/s}$ et décroît lors de son passage dans le diffuseur comme annoncé dans le chapitre sur l'état de l'art. La vitesse d'écoulement continue de diminuer jusqu'à l'entrée de la zone de vol qui correspond à un filtre. On voit donc que ce filtre permet de donner un caractère constant à la vitesse d'air. La valeur est maintenue constante $0,08\text{m/s}$ jusqu'à la sortie de zone de vol. Une fois cette zone passée, l'écoulement est de nouveau accéléré. Cette accélération est due à la contraction en sortie de tunnel. Ce profil de vitesse montre bien que l'ajout d'un filtre est important pour améliorer le caractère laminaire de l'écoulement. Une vitesse d'air constante au sein de la zone de vol permet alors d'améliorer les expérimentations olfactives sur les insectes. Bien que le profil de vitesse soit

satisfaisant, celui-ci n'atteint pas la valeur souhaitée en zone de vol c'est-à-dire 0,3m/s. Il faudrait donc soit jouer sur la vitesse d'entrée soit augmenter la porosité du filtre.

Profils verticaux de vitesse

Les figures 3.10 à 3.13 présentent les profils verticaux de vitesse obtenus par la simulation numérique sous OpenFOAM. La position des points de mesures correspond aux mêmes que ceux développés à la figure 2.3. Pour des raisons de concision seuls certains profils ont été retenus, un choix qui s'explique par leurs positions remarquables dans le tunnel de vol. Les points suivants sont présentés :

- la figure 3.14 correspond au point à 0,23m, il se situe dans la zone de dépôt en sortie des tuyaux.
- La figure 3.11 correspond au point à 1,15m, il correspond au milieu du tunnel.
- La figure 3.12 correspond au point à 1,61m, il correspond au point de dépôt des insectes lors des expérimentations, c'est un point clé pour le travail du CIRAD, il sera donc primordiale de connaître les caractéristiques de l'écoulement en ce point.
- Enfin la figure 3.13 correspond au point à 2,07m, c'est le point situé en sortie de zone de vol et qui permettra de connaître le profil juste avec le cône d'extraction.

L'ensemble de ces points permet de donner une idée sur l'évolution de l'écoulement tout au long du tunnel.

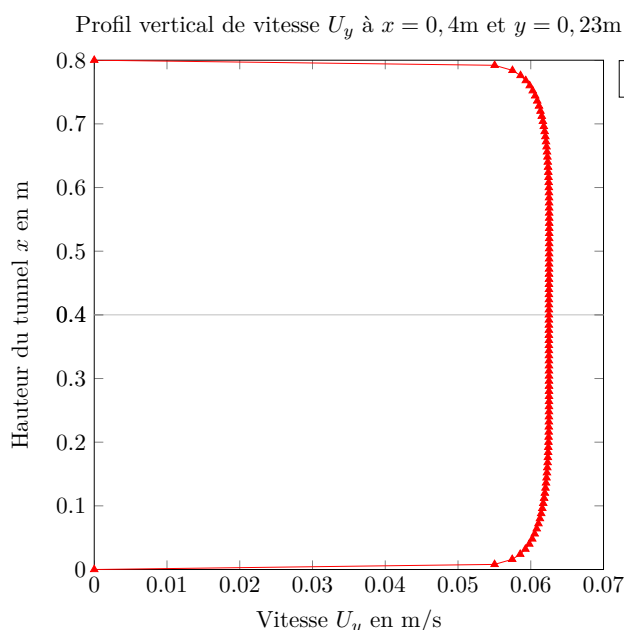


FIGURE 3.10 – Profil vertical de vitesse U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 0,23\text{m}$

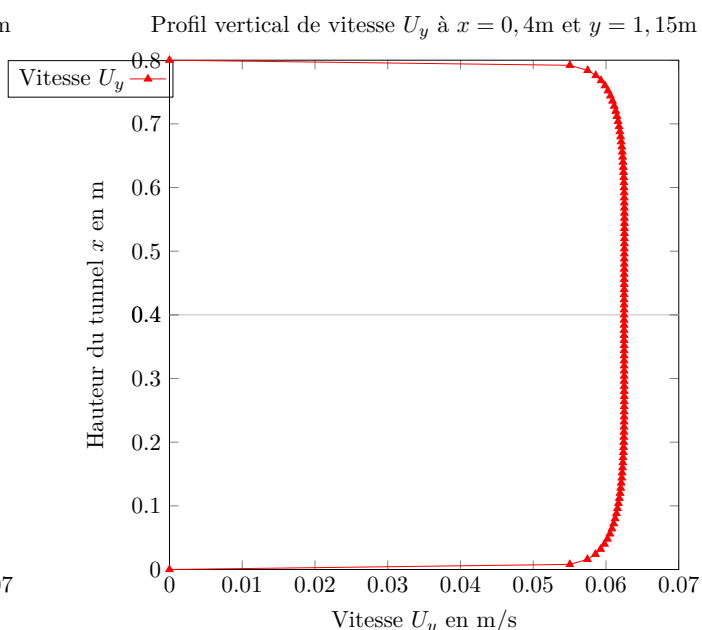


FIGURE 3.11 – Profil vertical de vitesse U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 1,15\text{m}$

Les profils verticaux de vitesses obtenus par simulation sont semblables aux profils paraboliques qui sont les caractéristiques des profils laminaires entre deux plaques. Il y a conservation dans la forme du profil de l'entrée jusqu'à la sortie du tunnel. La vitesse d'écoulement est maximale pour tous les profils entre les ordonnées 0,1m et 0,7m. La vitesse maximale d'écoulement est de 0,062m/s

et elle n'évolue pas tout au long du tunnel. Les profils de vitesses verticaux ne sont influencés par la présence du filtre. Lors de l'étude bibliographique (chapitre 1), les recherches ont montré que la présence d'un filtre amortisseur de turbulence permettait la réduction de la couche limite. Ici la couche limite atteint une valeur de l'ordre de 0,09m.

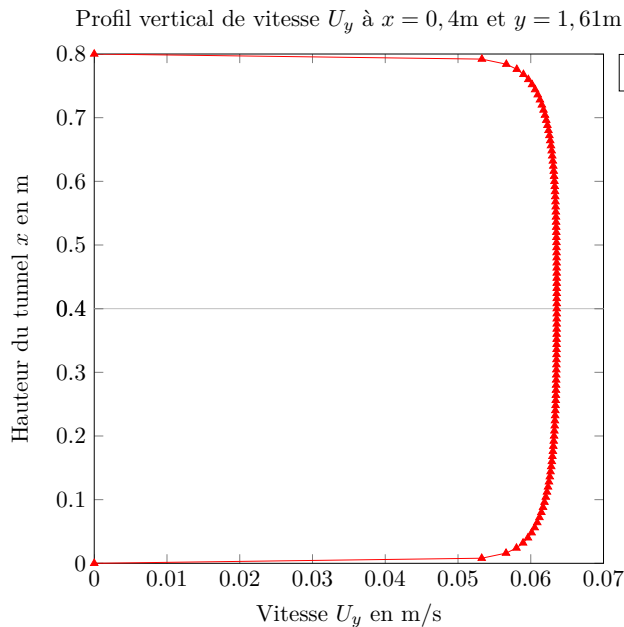


FIGURE 3.12 – Profil vertical de vitesse U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 1,61\text{m}$

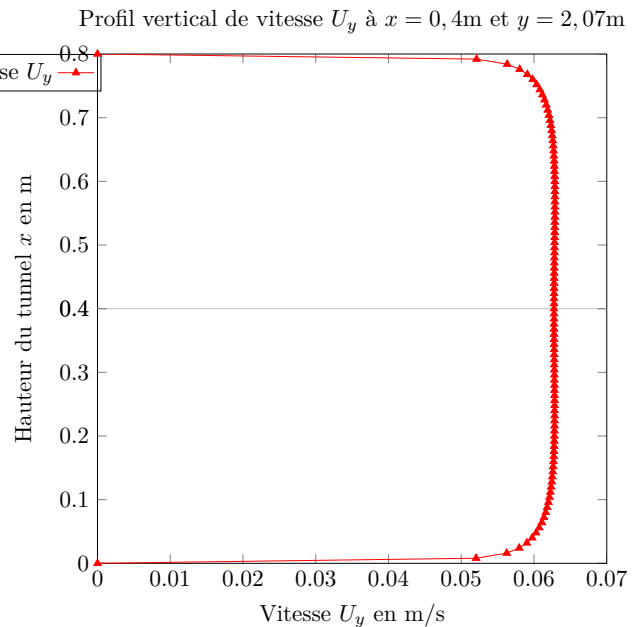


FIGURE 3.13 – Profil vertical de vitesse U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 2,07\text{m}$

Du point de vue de la recherche olfactive sur les insectes, ce profil de vitesse obtenu est intéressant. Il permet d'obtenir une vitesse constante de travail entre $z = 0,1\text{m}$ et $z = 0,7\text{m}$. Cependant la vitesse d'air souhaité pour leurs études est de $0,3\text{m/s}$ mais ici la vitesse ne dépasse pas les $0,07\text{m/s}$. Il serait donc intéressant d'augmenter la vitesse de consigne et de tester à nouveau la tendance des profils de vitesses.

Profils horizontaux de vitesse

Les points de calculs présentés dans cette sous-section sont ceux situés aux mêmes points sur l'axe y que ceux énoncés plus haut (sous-section 3.7.1). Cependant ceux-ci sont cette fois dans le plan horizontal (figure 2.4).

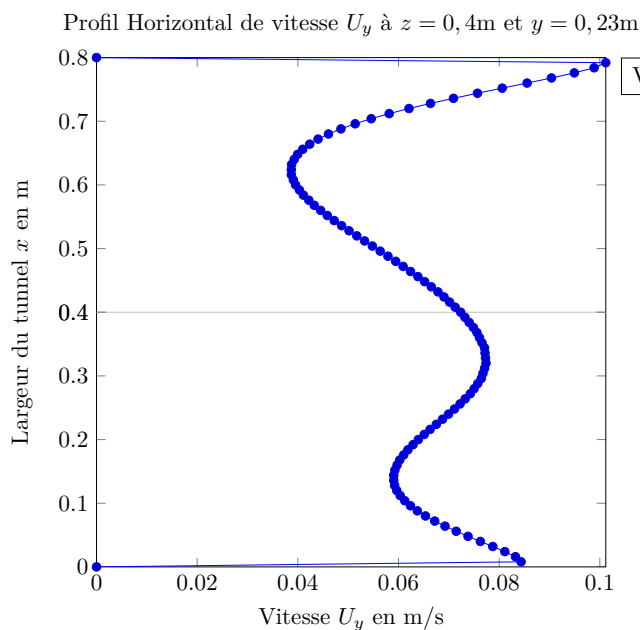


FIGURE 3.14 – Profil Horizontal de vitesse U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 0,23\text{m}$

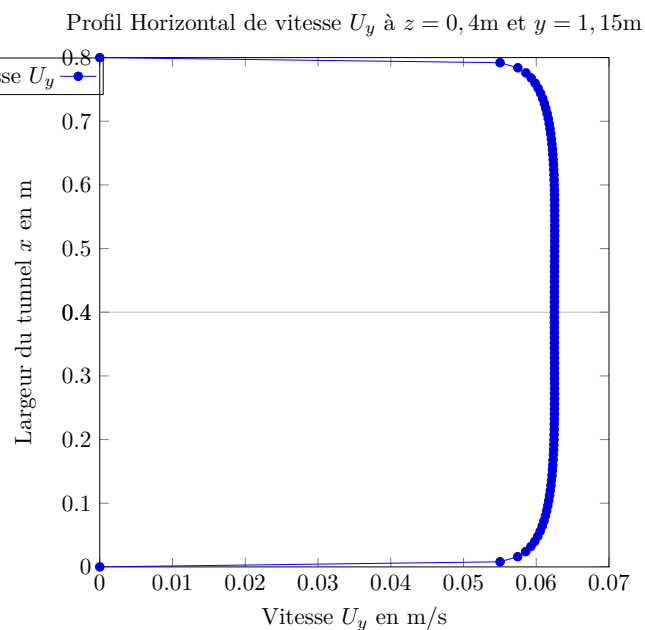


FIGURE 3.15 – Profil Horizontal de vitesse U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 1,15\text{m}$

Contrairement aux profils verticaux, l'étude de ces profils horizontaux montre l'influence du filtre. Le résultat est visible entre les points $y = 0,23\text{m}$ et $y = 1,15\text{m}$. Au point $y = 0,23\text{m}$ la vitesse d'air n'est pas du tout parabolique puisqu'elle présente deux pics de vitesses aux extrémités du tunnel de vol qui ont pour valeurs $0,11\text{m/s}$ et $0,082\text{m/s}$. Le profil n'est pas totalement « creux », il présente une accélération à $x = 0,32\text{m}$. Il n'y a pas de symétrie axiale à la moitié du tunnel. L'écoulement en ce point du tunnel est soumis à un pic d'énergie cinétique turbulente et le rapprochement des tuyaux et du filtre peut être à l'origine de ces perturbations. Aux points de mesures suivants l'écoulement retrouve un profil parabolique et symétrique avec une vitesse maximale de $0,062\text{m/s}$. L'effet de laminarisation du filtre peut alors être mis en avant.

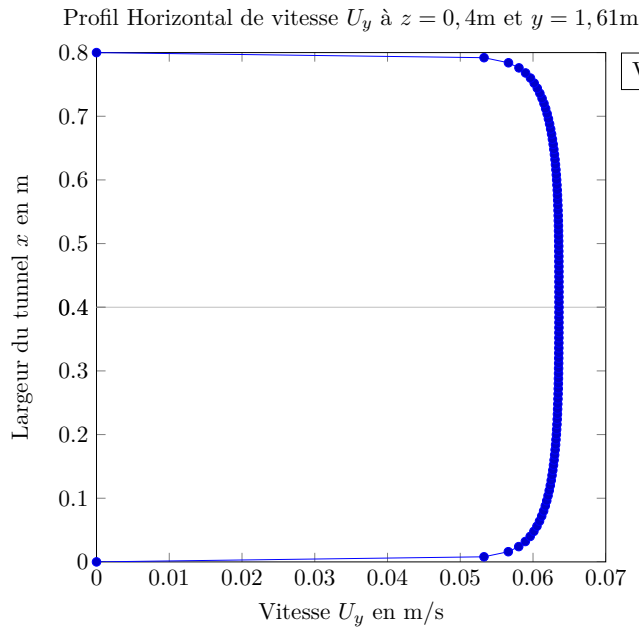


FIGURE 3.16 – Profil Horizontal de vitesse U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 1,61\text{m}$

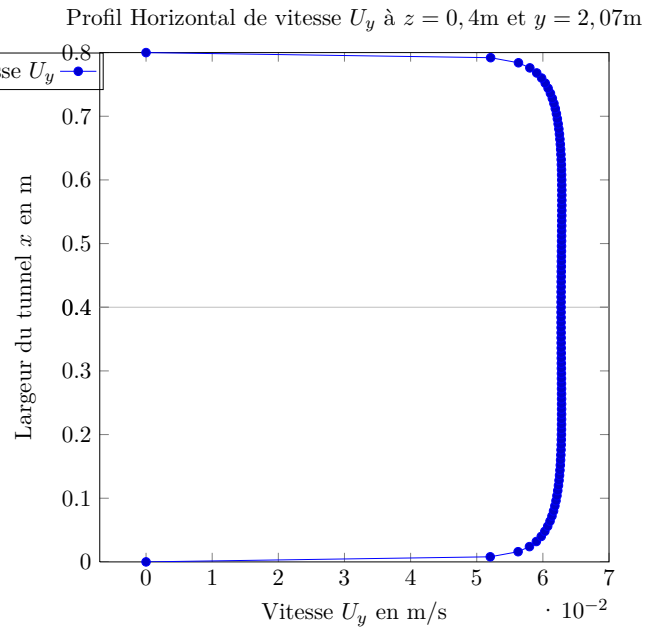
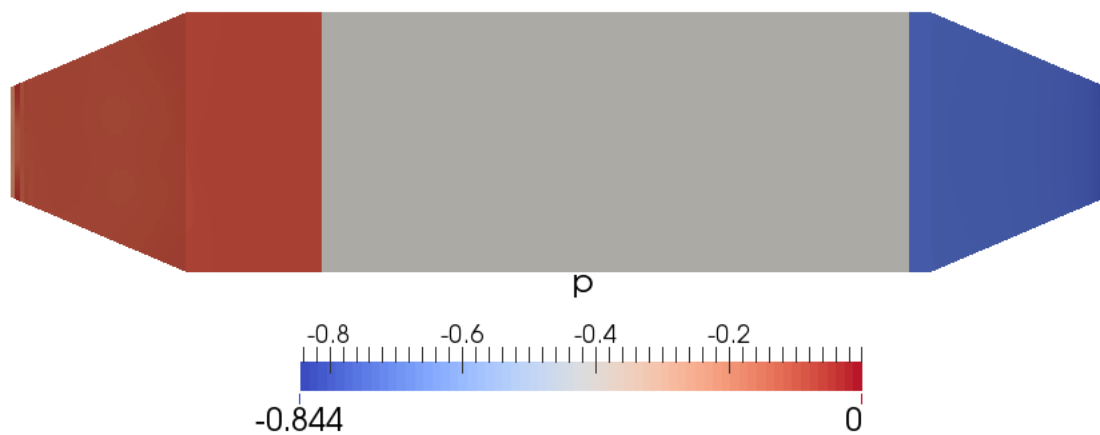


FIGURE 3.17 – Profil Horizontal de vitesse U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 2,07\text{m}$

Concernant l'étude de ce profil remarquable au point $y = 0,23\text{m}$ sur les expérimentations olfactives, le profil de vitesse d'air particulier ne perturbera pas les expérimentations car elle se situe dans la zone de dépôt de pots et ne concerne pas directement la zone de vol.

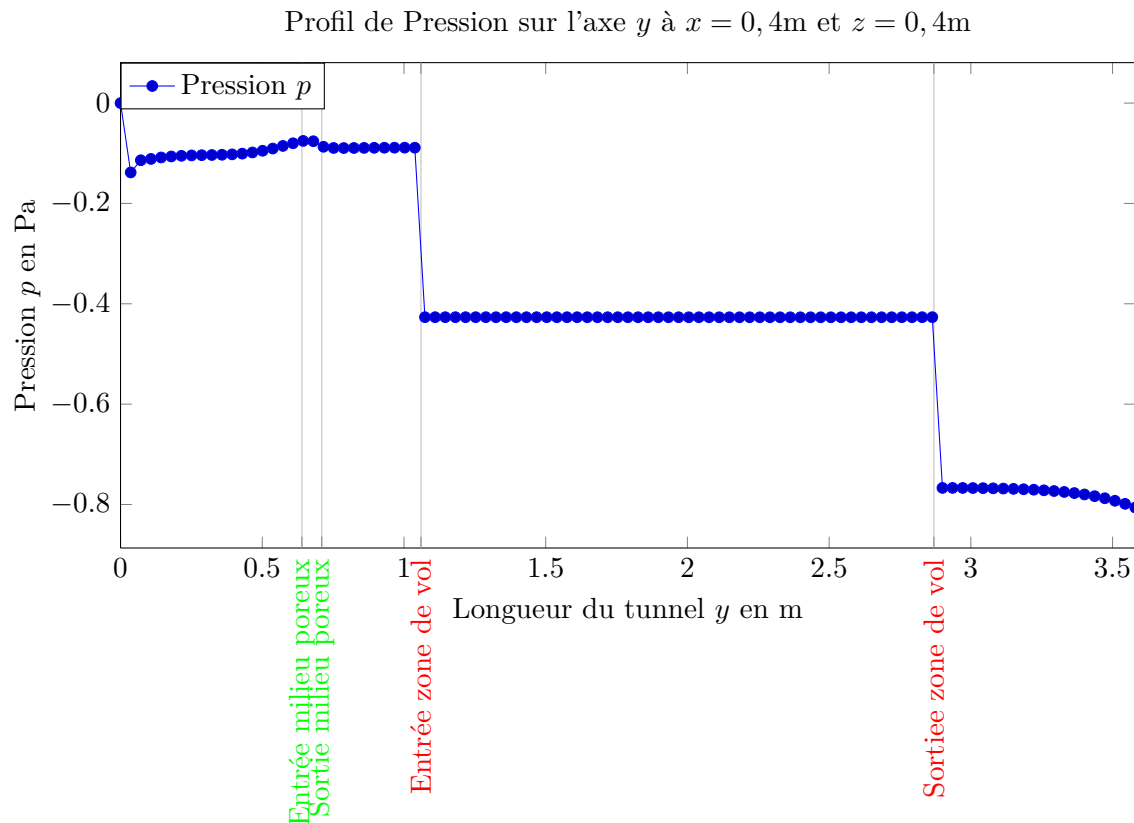
3.7.2 Champ de pression

L'étude sur laquelle porte ce mémoire a nécessité la résolution des équations de Navier-Stokes en résolvant le couplage pression-vitesse. La simulation a permis d'obtenir les résultats suivants (figure 3.18). Cette figure présente le champ de pression dans le tunnel sur un plan yz . Le champ de pression obtenu est entièrement négatif et il est la caractéristique même d'un tunnel en aspiration. Cette figure permet de distinguer 3 niveaux de pressions mais seule une étude de profil va permettre de décrire au mieux l'évolution de la pression au sein du tunnel de vol.

FIGURE 3.18 – Champ de pression du tunnel sur le plan zy à $y=0,4m$

Profil de pression

La figure 3.19 présente l'évolution de la pression sur l'axe y sur toute la longueur du tunnel aux points de coordonnées $x = 0,4m$ et $z = 0,4m$. Ce profil de pression se décompose en 3 parties distinctes par deux chutes de pression. Ces points de chutes de pression correspondent aux emplacements des milieux poreux de types filtres. A chaque filtre la pression diminue de $0,4Pa$. Ces 3 parties que l'on voit bien en figure 3.19, représentent chaque zone du tunnel. On a donc pour l'ensemble du tunnel une pression négative, ce qui est logique pour un tunnel en aspiration. La condition limite de pression en entrée est bien à 0 comme indiqué sur le graphique. Dans le cône d'entrée celle-ci reste relativement constante pour une valeur de $-0,1Pa$.

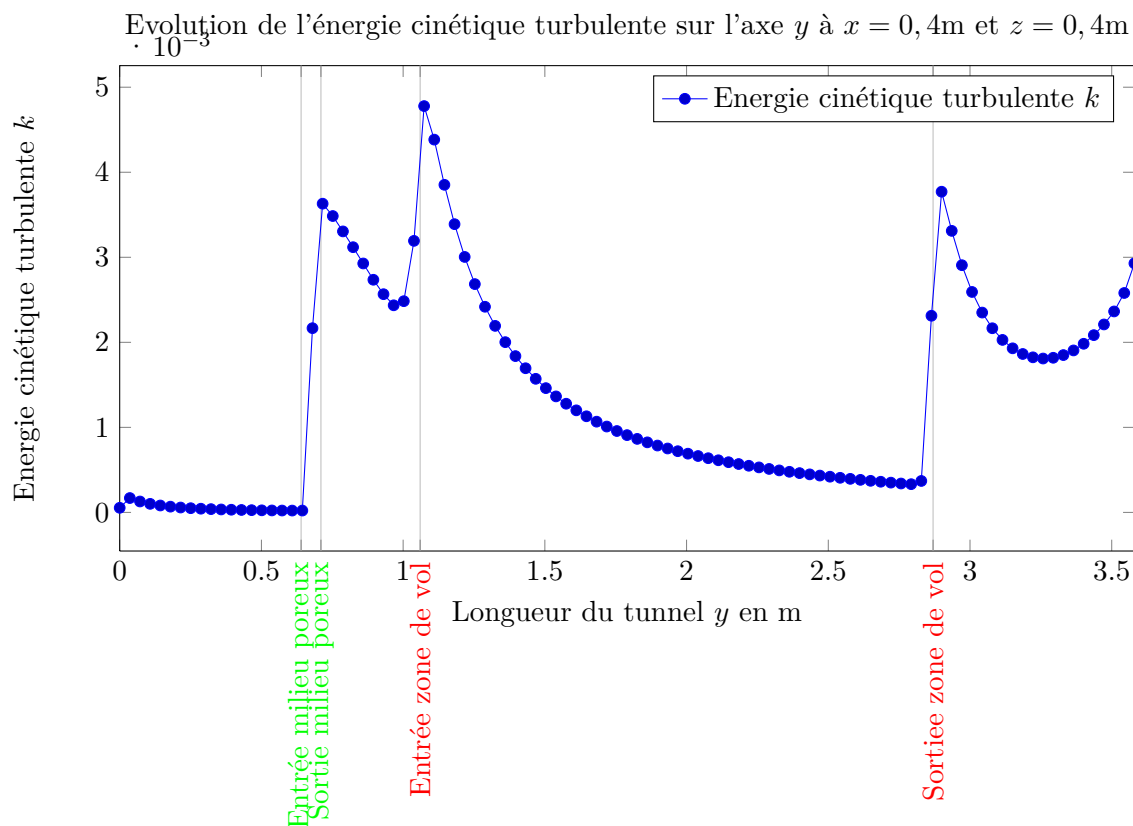
FIGURE 3.19 – Profil de Pression sur l'axe y à $x = 0,4\text{m}$ et $z = 0,4\text{m}$

L'écoulement d'air passe alors dans l'assemblage de tuyaux, qui perturbe la pression. La pression augmente au vu de la présence du milieu poreux sur l'intégralité de la surface du tunnel puis chute de nouveau pendant son passage dans les tuyaux. En sortie, la pression est de nouveau constante jusqu'au premier filtre. Les modèles de porosité qui prédisaient une chute de pression au niveau du filtre sont respectés. On passe de $-0,1\text{Pa}$ à $-0,4\text{Pa}$, cette valeur reste constante pour l'ensemble de la zone de vol du tunnel. En traversant le deuxième filtre, il se produit une deuxième chute de pression et qui passe alors à $-0,8\text{Pa}$

3.7.3 Énergie cinétique turbulente

L'étude de la turbulence repose sur l'étude des fluctuations autour de la vitesse moyenne. Lors de simulations en MFN², la résolution des équations permet d'obtenir l'évolution de l'énergie cinétique turbulente. Elle permet de caractériser l'intensité de la turbulence dans le tunnel de vol. La figure 3.20 montre l'évolution sur l'axe y sur toute la longueur du tunnel aux points de coordonnées $x = 0,4\text{m}$ et $z = 0,4\text{m}$ de l'énergie cinétique turbulente k .

2. Mécanique des fluides numériques

FIGURE 3.20 – Evolution de l'énergie cinétique turbulente sur l'axe y à $x = 0,4\text{m}$ et $z = 0,4\text{m}$

L'étude de ce profil permet de comprendre et de valider les éléments apportés par la bibliographie sur l'effet des filtres amortisseurs de turbulences. Le long de l'axe y cette variable subit de grande variation. Lors de son passage dans le cône d'entrée sa valeur est quasiment nulle. Lors de son entrée dans les tuyaux, il est intéressant de voir que sa valeur augmente brusquement jusqu'à $3,8 \cdot 10^{-3}$. Le graphique montre que chaque « pic » correspond à l'entrée de la zone du milieu poreux. Cette augmentation brusque pourrait mettre en avant le fait que la zone d'assemblage de tuyaux n'est soit assez longue. Une étude empirique [Mikhailova *et al.*, 1994] a montré l'importance de la longueur de ces assemblages de tuyaux ainsi que la position des filtres sur l'intensité de la turbulence dans un écoulement. Au vu des résultats et de éléments apportés par ce document, la longueur des tuyaux pourrait jouer un rôle dans l'intensité de la turbulence dans le tunnel de vol. Il serait intéressant d'y consacrer une étude spécifique pour déterminer la longueur de tube idéal pour optimiser l'écoulement laminaire dans le tunnel. L'élément important présenté dans ce graphique montre et valide l'utilisation d'un filtre pour réduire la turbulence. En effet, après chacun des deux filtres posés dans le tunnel, il y a une chute de la valeur de l'énergie cinétique turbulente. Au niveau du premier filtre, la valeur passe de $5 \cdot 10^{-3}$ à moins de $1 \cdot 10^{-3}$ en sortie de zone de vol. La présence du deuxième filtre provoque à nouveau l'augmentation de cette énergie cinétique turbulente. Ces éléments montrent qu'il existe des façons d'améliorer l'écoulement dans ce tunnel, notamment en rapprochant de l'entrée et des tubes le filtre afin de réduire la turbulence en sortie de la zone de dépôt. Cependant, la présence de cette turbulence pourrait être bénéfique lors de

études menées par le CIRAD car elle permettrait de répandre les particules odorantes dans tout l'ensemble du tunnel.

3.8 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

3.8.1 Comparaison du profil de vitesse longitudinale

La figure 3.22 présente la comparaison entre les résultats de simulations et les valeurs expérimentales du profil de vitesse longitudinale sur l'axe y .

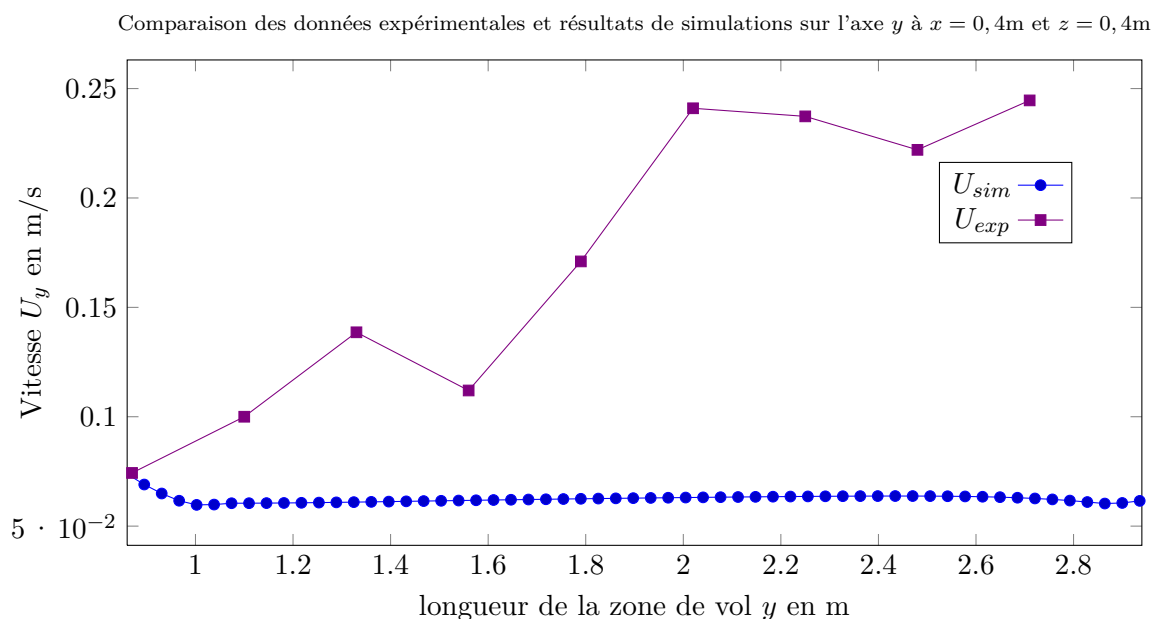


FIGURE 3.21 – Comparaison des données expérimentales et résultats de simulations sur l'axe y à $x = 0,4\text{m}$ et $z = 0,4\text{m}$

Cette comparaison montre qu'il existe un certain nombre de disparités entre les deux courbes. Le résultat de simulation U_{sim} présente un profil constant dans toute la zone de vol. Le profil de vitesse expérimental est croissant à l'entrée de la zone de la vol, il devient constant au-delà de 1,30m. La vitesse obtenue par simulation est de l'ordre de 0,06m/s tandis que la vitesse expérimentale varie entre 0,07m/s et 0,25m/s. L'écart entre les deux résultats est donc relativement important. Dans un contexte d'expérimentations sur les insectes, un tel résultat même avec un écart aussi important reste intéressant car les insectes ne subiront pas un vent plus important en remontant le tunnel de vol à cette altitude de $z = 0,4\text{m}$. De telles différences entre les résultats sont sans doute dues aux hypothèses réalisées, notamment sur le principe même de fonctionnement du tunnel. Le modèle numérique propose un tirage en sortie de 0,3m/s tandis que le tunnel lui fonctionne avec un moteur qui adapte sa charge en fonction de la vitesse annoncée par l'anémomètre du système. La modélisation réalisée pour ce mémoire ne prend pas en compte le système de tuyauterie qui présente de la tortuosité et de la rugosité relativement importantes qui ont un effet conséquent sur la nature de l'écoulement.

3.8.2 Comparaison des profils verticaux de vitesses

Les figures 3.22 à 3.29 présentent la comparaison sur les profils horizontaux et verticaux de vitesse d'air.

Les profils présentés en figure 3.22 présentent un résultat assez régulier pour le profil expérimental et très régulier pour le profil issu de la simulation. La vitesse U_{sim} atteint son maximum à 0,062m/s sur toute la hauteur du tunnel. La courbe expérimentale varie davantage. L'écart entre la vitesse expérimentale et la vitesse U_{sim} est de 0,1m/s dans la partie basse du tunnel ($z < 0,4m$) et de 0,2m/s dans la partie haute du tunnel ($z > 0,4m$).

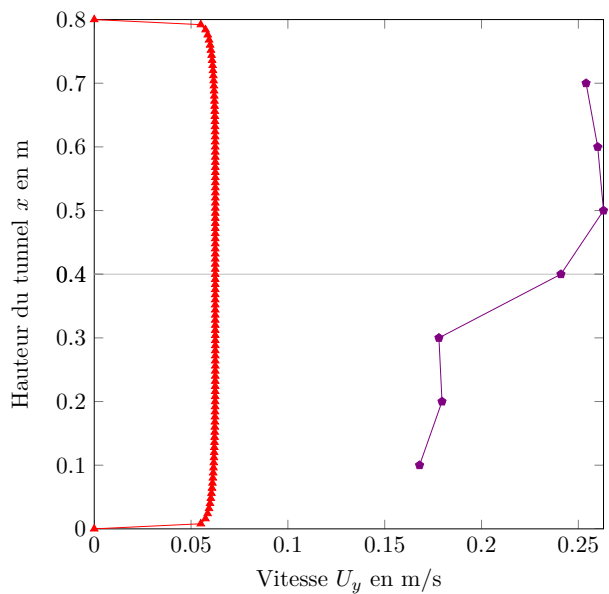


FIGURE 3.22 – Comparaison des profils verticaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $x = 0,4m$ et $y = 0,23m$

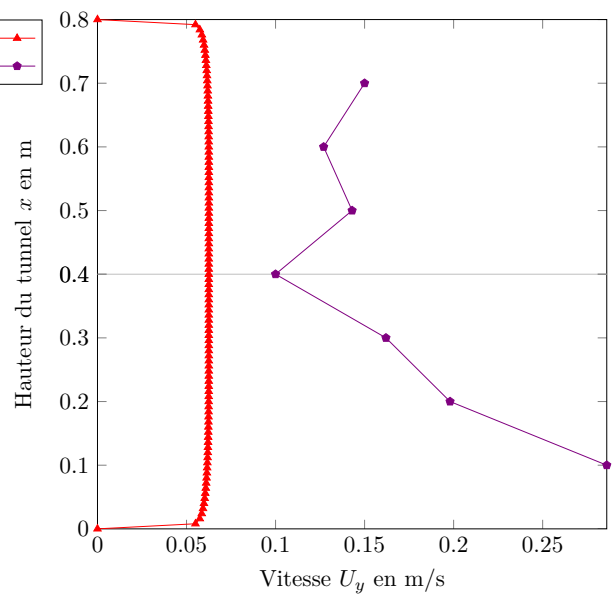


FIGURE 3.23 – Comparaison des profils verticaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $x = 0,4m$ et $y = 1,15m$

Le profil de vitesse situé à $y = 1,15m$ (figure 3.23) présente une plus grande différence. Un profil parabolique et régulier pour la vitesse issue de la simulation (U_{sim}) et un profil creux pour le profil de vitesse réelle. L'écart minimum de vitesse entre les deux courbes est de 0,05m/s et un maximum de 0,2m/s qui est situé au point le plus bas du tunnel, soit à $z = 0,1m$.

Le profil suivant (figure 3.24) présente un profil de vitesse expérimentale assez régulier avec des valeurs comprises entre 0,16m/s et 0,23m/s. La simulation donne un résultat assez rapproché avec des écarts allant de 0,10m/s au minimum et de 0,17m/s au maximum. Les valeurs les plus élevées sont situées dans la partie haute du tunnel contrairement au profil de vitesse issu de la simulation où la vitesse est régulière et la plus élevée sur toute la hauteur du tunnel.

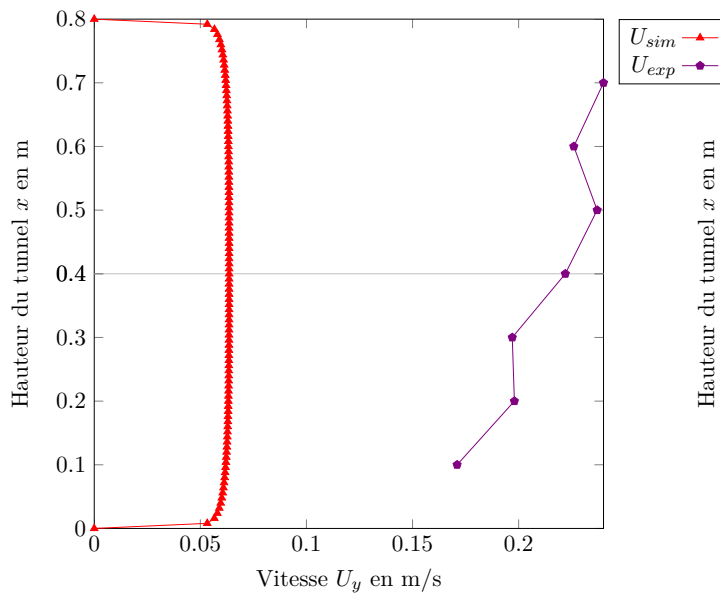


FIGURE 3.24 – Comparaison des profils verticaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 1,61\text{m}$

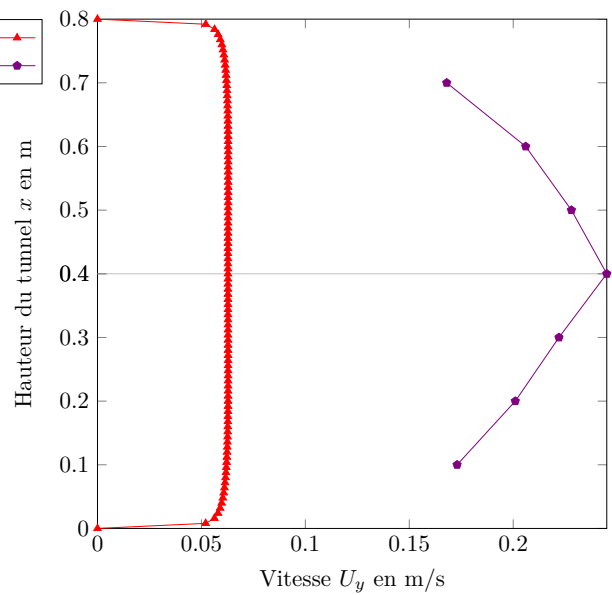


FIGURE 3.25 – Comparaison des profils verticaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $x = 0,4\text{m}$ et $y = 2,07\text{m}$

La figure 3.25 est la seule où le profil de vitesse présente une symétrie axiale par rapport l'axe $z = 0,4\text{m}$ qui rappelons le est la caractéristique d'un profil laminaire théorique. Le profil de vitesse expérimentale U_{exp} présente un maximum au centre d'une valeur de $0,23\text{m/s}$. Les résultats issues de la simulation restent très réguliers ($0,06\text{m/s}$) sur toute la hauteur. La courbe expérimentale a pour valeur minimale $0,16\text{m/s}$ et pour valeur maximale $0,23\text{m/s}$. L'écart entre les deux courbes varie entre $0,1\text{m/s}$ et $0,17\text{m/s}$.

3.8.3 Comparaison des profils horizontaux de vitesses

La figure 3.26 présente un profil expérimental U_{exp} relativement proche de celui de la simulation. Ces profils horizontaux sont les seuls où les vitesses issues de la simulation sont supérieures aux vitesses expérimentales. La vitesse maximale de U_{sim} est de $0,1\text{m/s}$ et celle de U_{exp} est de $0,06\text{m/s}$. Le pic de vitesse en partie haute du graphe se retrouve à la fois dans l'expérimentation et dans la simulation. Un autre pic de vitesse est visible dans la partie basse $x < 0,1\text{m}$. La seule différence se situe entre $x = 0,2\text{m}$ et $x = 0,5\text{m}$. La courbe de vitesse expérimentale présente un profil creux avec une vitesse d'air nulle tandis que la vitesse U_{sim} présente une parabole avec un max à $0,06\text{m/s}$.

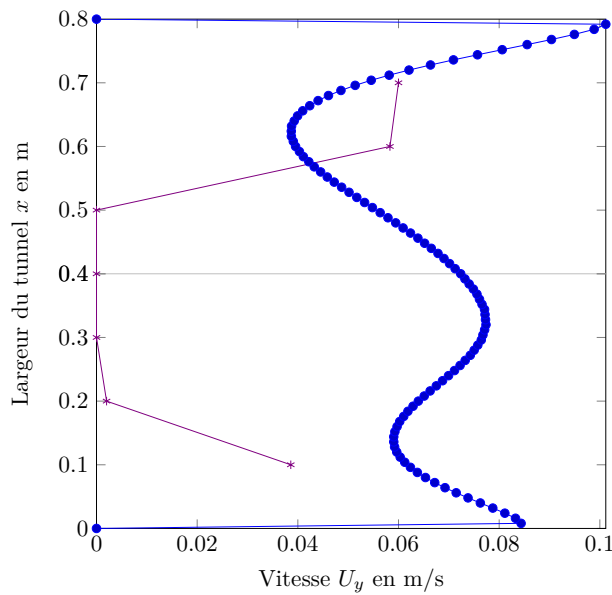


FIGURE 3.26 – Comparaison des profils horizontaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 0,23\text{m}$

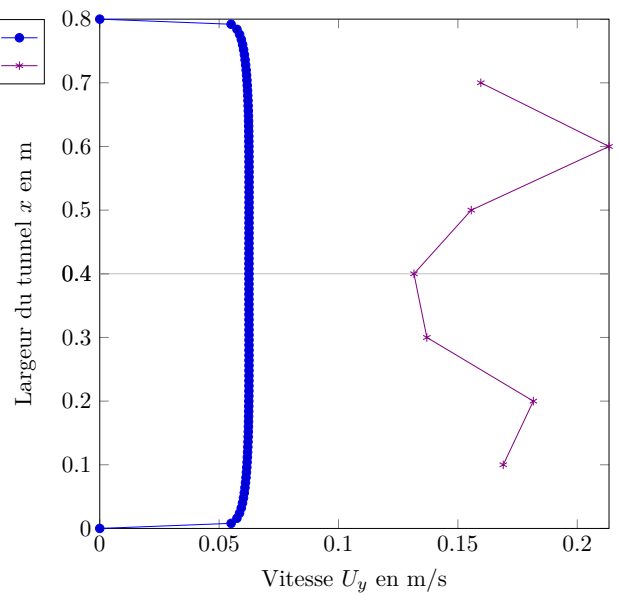


FIGURE 3.27 – Comparaison des profils horizontaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 1,15\text{m}$

La figure 3.27 présente la comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs issues de la simulation au point $y = 1,15\text{m}$. Une forte différence existe entre les profils. La vitesse expérimentale présente un creux avec un pic situé à $x = 0,6\text{m}$ tandis que le profil de vitesse simulé est un profil de vitesse régulier sur toute la largeur du tunnel de vol. Les deux courbes possèdent un écart minimum de $0,09\text{m/s}$ et un écart maximum de $0,15\text{m/s}$.

La figure suivante 3.28 présente de nouveau une différence moins grande entre les deux courbes. Le profil parabolique et symétrique se retrouve dans les deux courbes. L'axe de symétrie ne se situe cependant pas à la même ordonnée. Le maximum se situe à $x = 0,5\text{m}$ et ces deux courbes possèdent un écart allant de $0,05\text{m/s}$ à $0,14\text{m/s}$.

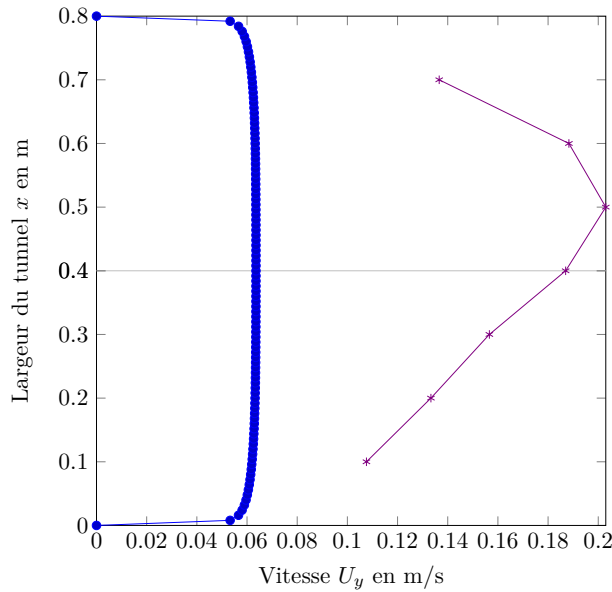


FIGURE 3.28 – Comparaison des profils horizontaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 1,61\text{m}$

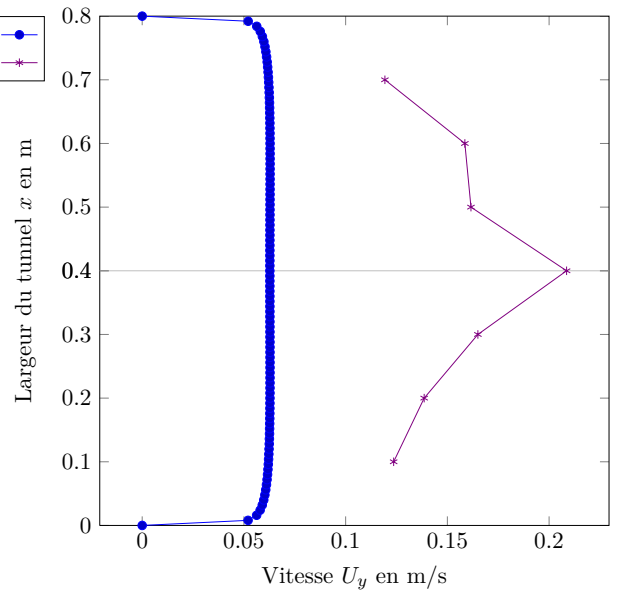


FIGURE 3.29 – Comparaison des profils horizontaux de vitesses expérimentales et de simulations U_y à $z = 0,4\text{m}$ et $y = 2,07\text{m}$

Ce dernier cas de comparaison (figure 3.29) présente toujours de la symétrie dans le profil de vitesse issue de la simulation ainsi que pour la courbe de vitesse expérimentale sauf pour un point situé à $x = 0,5\text{m}$. La vitesse maximum est de $0,06\text{m/s}$ pour la vitesse simulée U_{sim} , soit un écart de $0,16\text{m/s}$. Au vu de ce résultat et de la courbe précédente (figure 3.28), il est intéressant de savoir si le point situé en $x = 0,5\text{m}$ pour la courbe expérimentale est une erreur de mesure ou correspond bien à la réalité. Des éléments amènent à penser que ce point ne présente pas d'erreur car au vu de la courbure du profil en partie basse (entre $x = 0,1\text{m}$ et $x = 0,4\text{m}$) celui-ci traduit une présence de la couche limite. Cependant la présence toute proche de l'extraction et du rétrécissement de la section du tunnel entraîne l'étirage du profil.

3.9 Bilan

Ce chapitre a permis de montrer l'ensemble de la démarche de modélisation du tunnel de vol du CIRAD sous OpenFOAM. Chacune des étapes de la modélisation a été présentée :

- réalisation du maillage ;
- choix des conditions limites ;
- choix des modèles de turbulence et de porosité ;
- choix de maillages et convergence des résultats ;
- simulation et comparaison des résultats avec l'expérimentation.

La dernière étape a permis de valider l'utilisation des filtres et d'assemblages de tuyaux pour donner un caractère laminaire à l'écoulement d'air. Les simulations numériques ont permis de confirmer l'utilisation des tuyaux pour réduire les composantes latérales U_x et U_z de l'écoulement. L'utilisation d'un filtre permet de réduire la vitesse d'écoulement et de réduire l'énergie cinétique

turbulente. Cependant l'utilisation de ces deux éléments requiert une optimisation de la porosité et du coefficient de perméabilité du filtre pour mieux contrôler la vitesse d'écoulement. D'un point de vu entomologique ces simulations ont montré que l'utilisation d'un filtre et d'un assemblage de tuyaux permettront d'améliorer la qualité des expérimentations. Cependant, l'optimisation est nécessaire pour avoir une vitesse d'air de l'ordre de 0,3m/s. La reproduction du réel est très difficile en mécanique des fluides numérique, ceci est confirmé par les résultats obtenus au cours de ce chapitre. La simulation se rapproche du résultat réel avec un écart maximal allant jusqu'à 0,23m/s. Les profils de vitesses horizontaux et verticaux obtenus à partir de l'amplitude de vitesse ne reflètent pas totalement les résultats de la composante U_y de la vitesse. Lors de la modélisation d'un tel tunnel, la difficulté se situe dans le choix des modèles associés et notamment sur les modèles de porosité. Ne pouvant passer par une description détaillée, tuyaux par tuyaux ou pore par pore de chaque filtre, il faut remplacer ces parties physiques par des modèles numériques qui ne prennent pas forcément en compte les éventuelles perturbations associées. L'exemple des allées de Von-Karman semble être le plus concret car avec l'utilisation de Darcy-Forchheimer il est impossible de retrouver ces perturbations en aval du filtre. Un certain nombre d'hypothèses peut apporter des incertitudes à la modélisation, comme exemple l'utilisation d'un solveur en régime permanent alors que le problème est en dynamique. Des éléments ne peuvent pas être pris en compte telles que les variations de la puissance moteur de l'extracteur qui entraîne des modifications dans la vitesse d'écoulement d'air. Cette étude numérique tente d'approcher au mieux l'écoulement d'air dans le tunnel, bien qu'il soit très difficile d'obtenir des résultats exacts.

CHAPITRE 4

TRANSPORT D'UN COMPOSÉ ORGANIQUE VOLATIL

Sommaire

4.1	Présentation du problème	61
4.2	Équation de transport	61
4.3	Modification du solveur existant	61
4.4	Conditions aux limites	65
4.5	Résultats et discussions	66
4.6	Bilan	68

4.1 Présentation du problème

Le principe du tunnel de vol est de tester la réponse comportementale des insectes à un stimulus olfactif. Le contrôle de l'écoulement par l'ajout d'un filtre amortisseur de turbulence permet d'améliorer ces expérimentations. Cependant, l'ajout d'un filtre peut changer la diffusion et la dispersion des particules odorantes. Ce chapitre propose une résolution d'une équation de transport de matières à partir des simulations réalisées au chapitre précédent.

4.2 Équation de transport

Pour modéliser le transport et la diffusion de particules au sein d'un milieu, une équation de transport doit être implémentée. L'équation 4.1 est un modèle de transport de scalaire. Cette équation est la suivante :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (4.1)$$

D représente le coefficient de diffusion dans le milieu et C la matière transportée.

4.3 Modification du solveur existant

OpenFOAM propose des solveurs dont un qui permet de résoudre le transport passif d'un scalaire (Température). Le code de calcul Openfoam étant open-source d'OpenFOAM, il permet la libre modification pour personnaliser ses solveurs. Le solveur idéal dans le cas de cette étude est *scalarTransportFoam* car celui-ci permet la résolution du transport d'un scalaire c'est à dire la température. L'objectif de cette étape est d'adapter le solveur au transport d'une concentration de matière. L'équation implémenté dans ce solveur est la suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = D_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4.2)$$

Par identification avec l'équation 4.1, une légère modification du code permettra de résoudre le transport d'un COV¹.

4.3.1 Modification du fichier scalarTransportFoam

La modification d'un solveur passe par la modification du code du solveur : Dans ce cas il faut changer les variables T par une autre de concentration qui sera nommée C . Ce fichier C sera lu à la dernière itération du calcul. De plus la constante de diffusion DT étant dans les mêmes unités que la diffusion d'une particule dans l'air, celle-ci sera laissée et sera lue dans le fichier *transportProperties* .

1. Composé organique volatil

Listing 4.1 – Modification du solveur *scalarTransportFoam*

```
// * * * * *  
Info<< "\nCalculating scalar transport\n" << endl;  
#include "CourantNo.H"  
while (simple.loop())  
{  
    Info<< "Time = " << runTime.timeName() << nl << endl;  
  
    while (simple.correctNonOrthogonal())  
    {  
        solve  
        (  
            fvm::ddt(C) //modification de la variable T en C  
            + fvm::div(phi, C)  
            - fvm::laplacian(DT, C)  
            ==  
            fvOptions(C)  
        );  
    }  
    runTime.write();  
}  
Info<< "End\n" << endl;  
return 0;  
}  
// * * * * *
```

4.3.2 Création d'un champs scalaire : concentration C

Listing 4.2 – Création du champ scalaire concentration C

```

Info<< "Reading field C\n" << endl; //nouvelle partie ajoutée dans le code
volScalarField C //création du champ scalaire C
(
    IObject
    (
        "C",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IObject::MUST_READ,
        IObject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
); //fin de la nouvelle partie
Info<< "Reading field U\n" << endl;
volVectorField U
(
    IObject
    (
        "U",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IObject::MUST_READ,
        IObject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);
Info<< "Reading transportProperties\n" << endl;
IOdictionary transportProperties
(
    IObject
    (
        "transportProperties",
        runTime.constant(),
        mesh,
        IObject::MUST_READ_IF_MODIFIED,
        IObject::NO_WRITE
    )
);
Info<< "Reading diffusivity DT\n" << endl;
dimensionedScalar DT
(
    transportProperties.lookup("DT")
);
# include "createPhi.H"

```


Bien que le solveur soit modifié, la résolution de ce problème impose la création d'un champs scalaire qui sera transporté. Celui-ci étant une concentration il aura pour dimension, des kg/m^3 . La création d'un tel fichier se passe en deux étapes. Tout d'abord, il faut indiquer au solveur qu'il devra lire ce fichier C (voir dans le code ci-dessous). La deuxième étape est la création d'un fichier « C » dans le répertoire « 1000 » du cas d'étude. Celui-ci va permettre au solveur de lire le champs de vitesse à la dernière itération de la précédente simulation.

Listing 4.3 – Création du fichier constante concentration C

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       C;
}
// * * * * *

dimensions      [1 -3 0 1 0 0 0]; //concentration en kg/m3

internalField    uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 1; //initialisation 1kg/m3 en entrée du domaine
    }

    outlet
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 0; //fixe 0 en sortie du domaine
    }

    defaultFaces
    {
        type      zeroGradient;
    }
}
}
```

Le fichier C est un fichier de constante. IL a été modifié au niveau de la ligne "dimensions", les valeurs attribuées 1 et -3 correspondant aux unités kg et m³. Le fichier est ensuite paramétré comme un fichier de conditions limites traditionnel. Pour mieux comprendre la résolution du problème du transport par le solveur, la figure 4.1 présente la synoptique de résolution. La simulation débute sur la dernière itération de la résolution du couple pression/vitesse avec le solveur *porousSimpleFoam*. Le fichier C est alors lu par le solveur du transport et il résout le transport de matière.

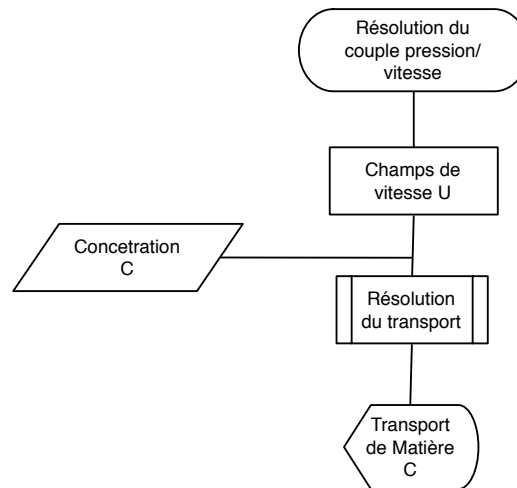


FIGURE 4.1 – Processus du calcul du transport de matière

4.4 Conditions aux limites

Le solveur étant modifié, les conditions aux limites du problème doivent être posées. Le tunnel est exactement le même que celui du chapitre 3. Pour la résolution de l'équation de transport, le solveur calcul le transport à partir du champs vectoriel U de la résolution précédente. Pour les conditions aux limites de concentration, une valeur arbitraire de 1kg/m^3 est imposée en entrée et une valeur de 0 en sortie.

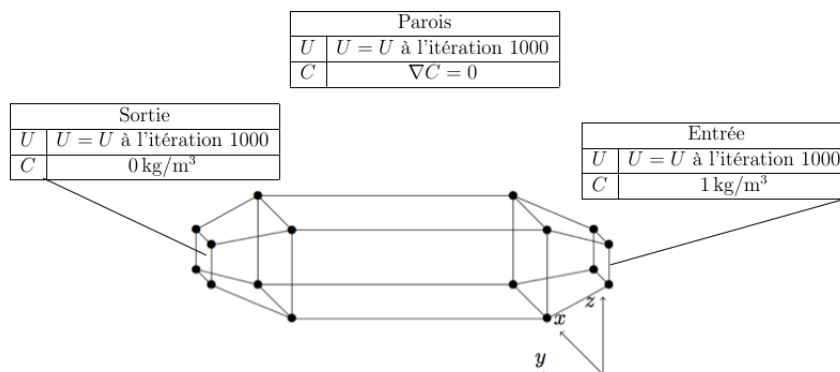


FIGURE 4.2 – Conditions aux limites des grandeurs pour le calcul du transport de COV

4.5 Résultats et discussions

4.5.1 Convergence en résidus

Le contrôle de la convergence en résidus du calcul s'impose pour vérifier que le résultat ne diverge pas ou n'oscille pas. L'étude de la convergence en résidus présentée en figure 4.3 montre que le calcul converge bien, les résultats sont donc exploitables.

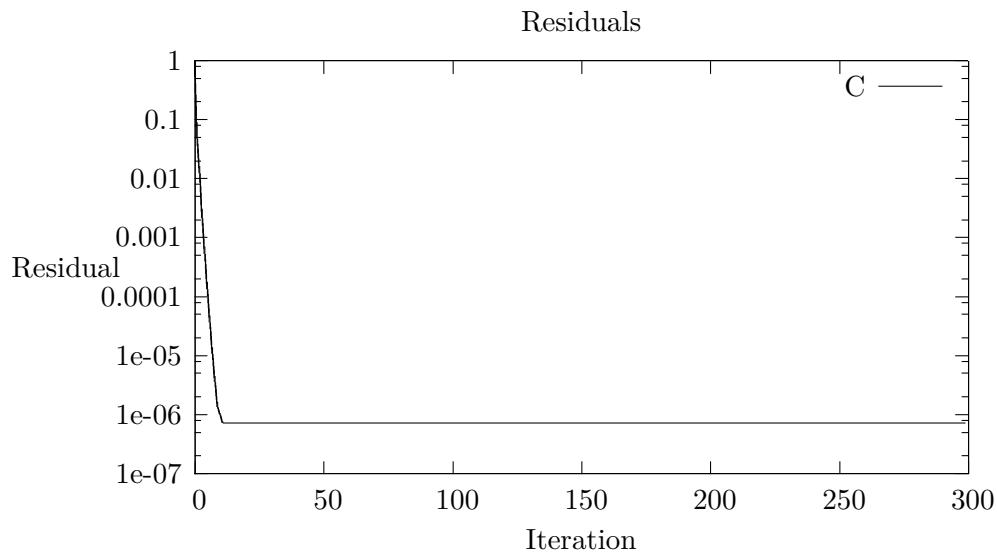
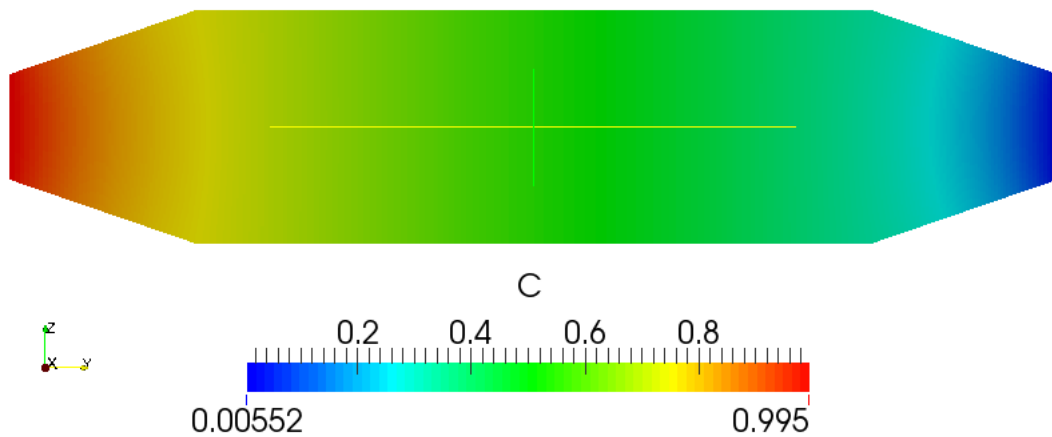


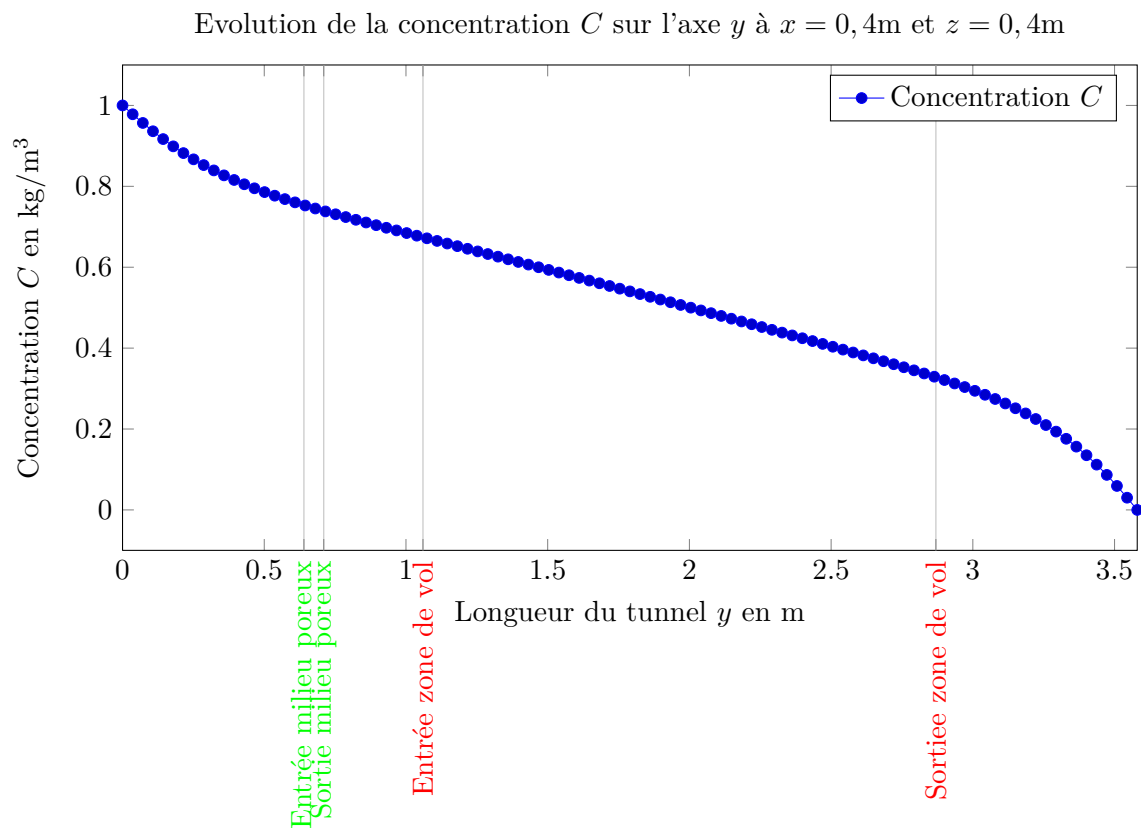
FIGURE 4.3 – Convergence des résidus de calculs pour la résolution de l'équation de transport

4.5.2 Résultats de simulations

La figure 4.4 présente l'évolution spatiale de la concentration C dans le tunnel de vol. Le transport de la concentration C décroît jusqu'à atteindre une valeur nulle en sortie de tunnel. Dans leurs expériences olfactives, le CIRAD a besoin que ce « nuage » de COV couvre une grande partie du tunnel pour que les insectes soient soumis à l'odeur, quelque soit leurs positions. Les résultats de simulations montrent que sur toute la hauteur z du tunnel la concentration est répartie de façon régulière. De plus, après passage du filtre la concentration C passe directement d'une couleur jaune ($\sim 0,8\text{kg/m}^3$) à une couleur verte ($\sim 0,6\text{kg/m}^3$).

FIGURE 4.4 – Champ du transport de matière C

Il est intéressant d'étudier le profil de concentration C sur la longueur du tunnel pour mieux comprendre le transport de matière. La figure 4.5 présente ce profil de concentration sur un axe situé aux coordonnées $x = 0,4\text{m}$ et $z = 0,4\text{m}$.

FIGURE 4.5 – Évolution de la concentration C sur l'axe y à $x = 0,4\text{m}$ et $z = 0,4\text{m}$

Le transport de matière s'effectue dans le tunnel de l'entrée à la sortie en suivant une décroissance presque linéaire. Cette décroissance linéaire est observée dans la zone de vol du tunnel. Avec une condition initiale fixée à 1kg/m^3 en entrée du tunnel, la concentration atteint une valeur de

0,78kg/m³. Dans la zone de vol, partie la plus intéressante pour les chercheurs du CIRAD, la valeur varie entre 0,68kg/m³ après le filtre et 0,39kg/m³ à la sortie. La concentration en COV reste donc exploitable pour les expériences en olfactométrie.

4.6 Bilan

L'utilisation d'un filtre amortisseur de turbulence permet d'améliorer le caractère laminaire du régime d'écoulement mais il influence le transport des particules odorantes. Ce chapitre a permis de mettre en avant les résultats du transport de particules d'un composé organique volatil dans le tunnel.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont montré que l'évolution spatiale de la concentration d'un COV au sein du tunnel de vol était constante dans le plan xz et qu'elle subissait une décroissance quasi-linéaire entre l'entrée et la sortie du tunnel.

De part ces résultats, les expériences olfactives du CIRAD sont donc possibles avec la pose d'un filtre de ce type.

La modification d'un solveur comme présenté dans ce chapitre est une méthode simple pour calculer le transport de scalaire dans un milieu fluide. Néanmoins, une autre méthode plus complexe existe qui consiste en l'ajout d'une équation de transport au solveur *porousSimpleFoam*. Cette méthode permet d'obtenir des résultats plus précis car le transport est couplé au calcul lors des passages à travers les milieux poreux du tunnel de vol.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

La compréhension de la réponse comportementale des insectes sur des plantations ou sur des cultures en laboratoire comme celui du CIRAD passe par l'utilisation de tunnels de vols. Ce mémoire portant sur la comparaison de données expérimentales et des résultats de simulations a permis de mettre en avant un certain nombre d'éléments. Les entomologistes ont pour leurs études, la possibilité de travailler sur différents types de tunnels. La forme des tunnels ou encore les méthodes de ventilations sont nombreuses. Cependant, au travers de ce mémoire il a été montré qu'aucune méthode de dimensionnement spécifique n'existait. La turbulence fait office d'élément perturbateur dans les expérimentations sur les insectes, elle nuit au vol des insectes et contribue à la mauvaise dispersion des particules odorantes dans les tunnels de vol. Les différentes équipes de recherches travaillant sur le sujet ont donc proposé des méthodes de réduction dérivant des tunnels utilisés en ingénierie. Ce mémoire a permis de retenir deux solutions techniques pour réduire la turbulence et laminariser l'écoulement.

Dans un second temps, ce mémoire a répondu de façon numérique à la modélisation d'un tunnel de vol par l'utilisation du code de calcul OpenFOAM. Le choix d'un certain nombre d'hypothèses sur le problème physique a porté des approximations quant aux résultats de simulations. Bien qu'il soit difficile d'approximer la réalité, la mécanique des fluides numérique est un atout de qualité dans la mise en place d'un tunnel de vol pour insectes de son dimensionnement ainsi que l'essai de solution pour réduire la turbulence. La MFN permet d'optimiser l'écoulement d'air à moindre coût. De plus la simulation numérique en volumes finis permet en étudiant le transport de particules de réaliser des corrélations entre la répartition spatiale de composés organiques volatils et le comportement des insectes.

Ce mémoire ouvre une voie de travail intéressante sur les tunnels de vol pour insectes. Une meilleure représentation des phénomènes réels pourrait se faire avec un raffinement du maillage et un changement du solveur, pour une meilleure prise en compte des phénomènes qui ne sont pas visibles en régime permanent. Enfin, un enjeu important de l'étude numérique de ces tunnels serait d'améliorer la modélisation des milieux poreux et de leurs véritables effets sur l'écoulement.

ANNEXE A

PROFILS VERTICAUX DE L'AMPLITUDE DE VITESSES

A.1 Profils verticaux de l'amplitude de vitesse à $x=0,1\text{m}$

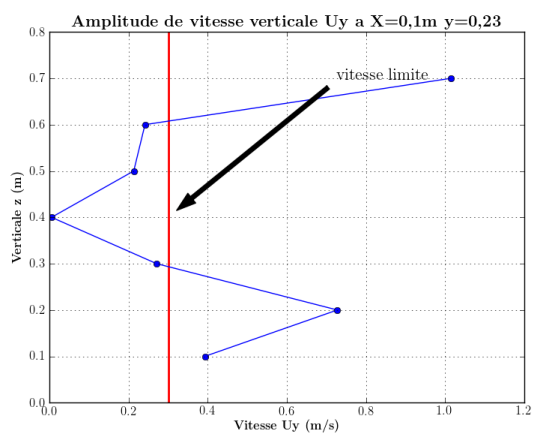


FIGURE A.1 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,23\text{m}$

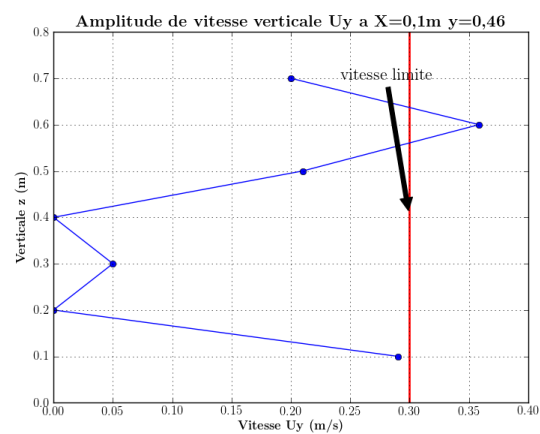


FIGURE A.2 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,46\text{m}$

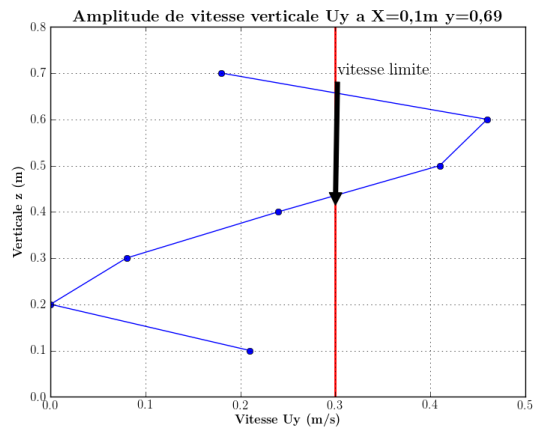


FIGURE A.3 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,69\text{m}$

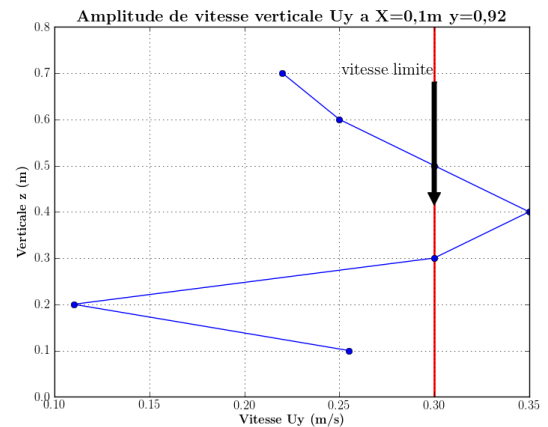


FIGURE A.4 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,92\text{m}$

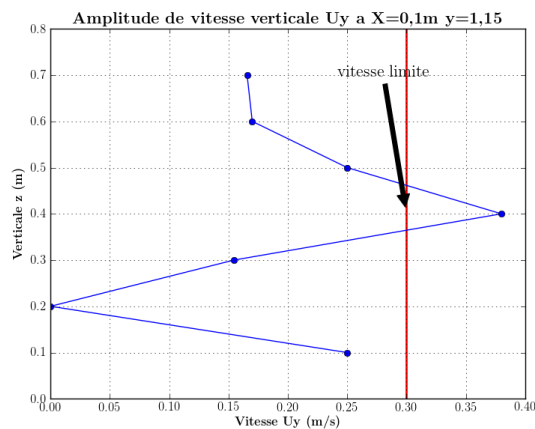


FIGURE A.5 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,15\text{m}$

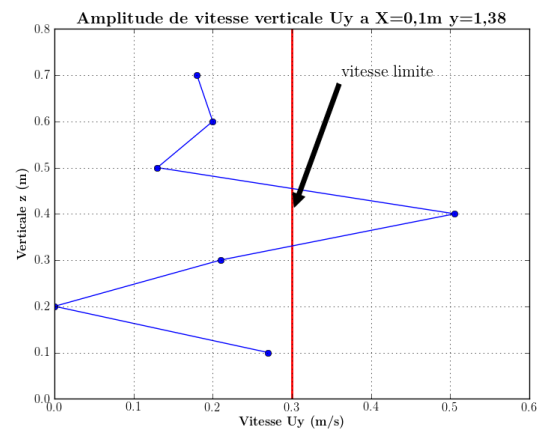


FIGURE A.6 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,38\text{m}$

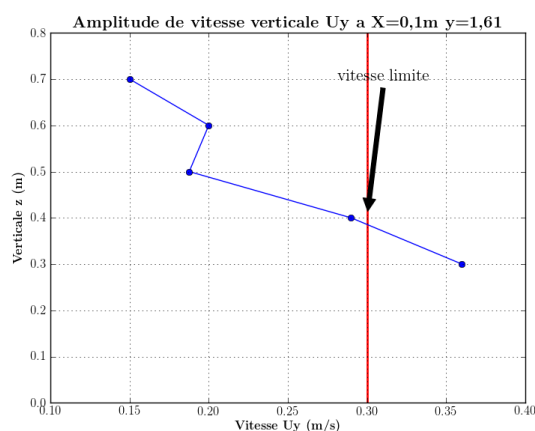


FIGURE A.7 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,61\text{m}$

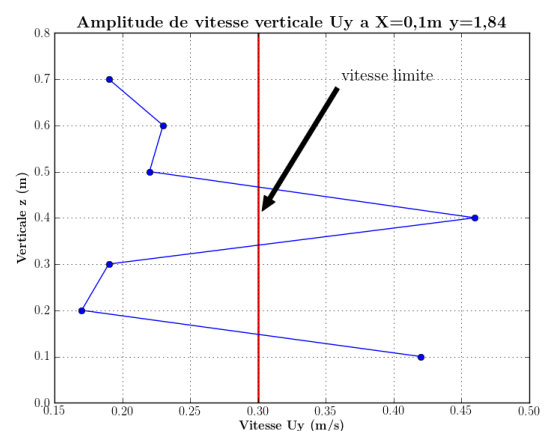


FIGURE A.8 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,84\text{m}$

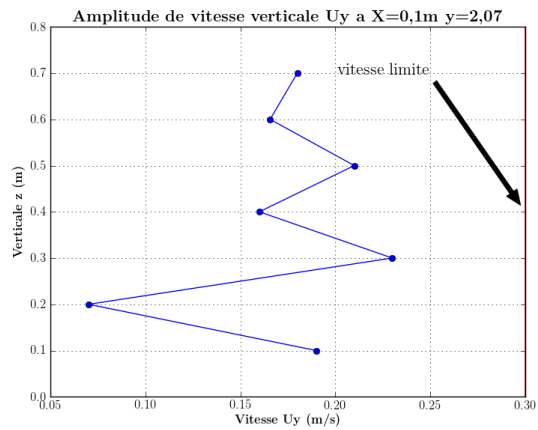


FIGURE A.9 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=2,07m

A.2 Profils verticaux l'amplitude de vitesse à x=0,2m

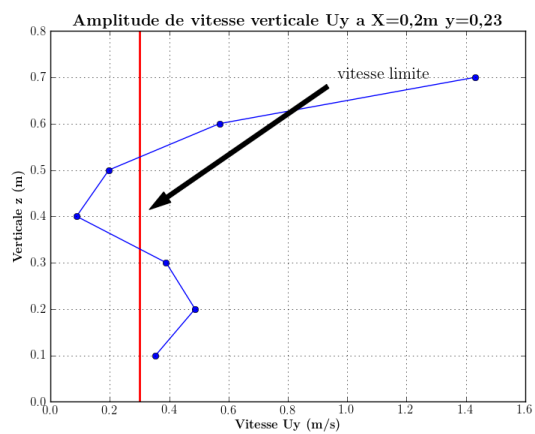


FIGURE A.10 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,23m

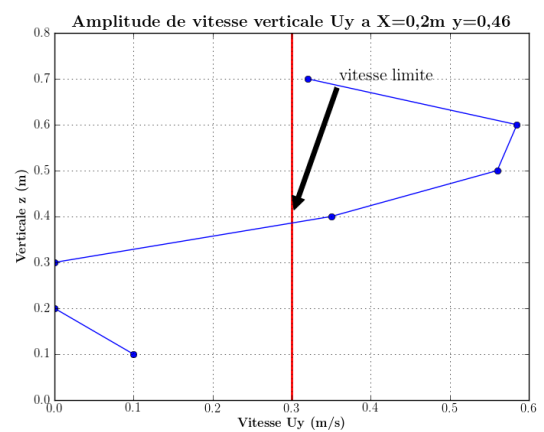
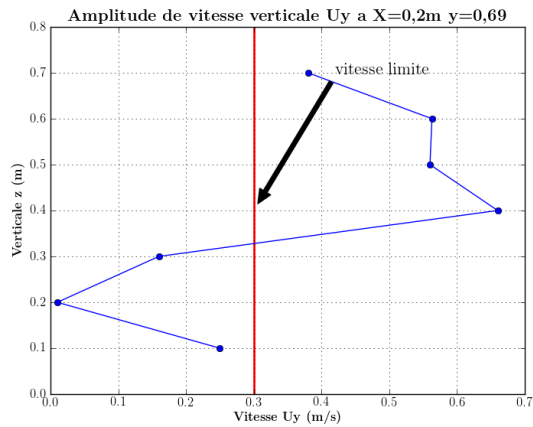
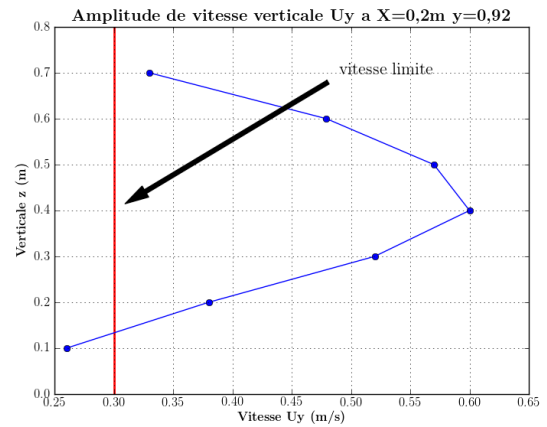
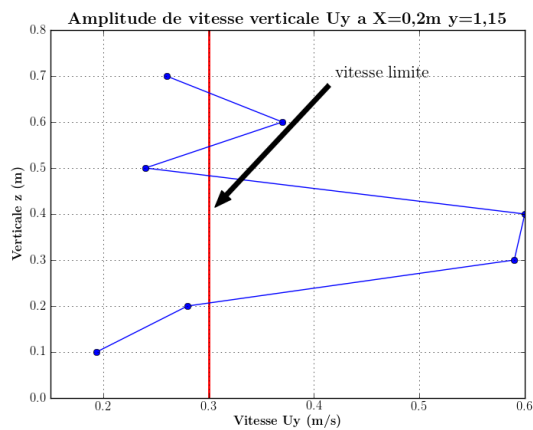
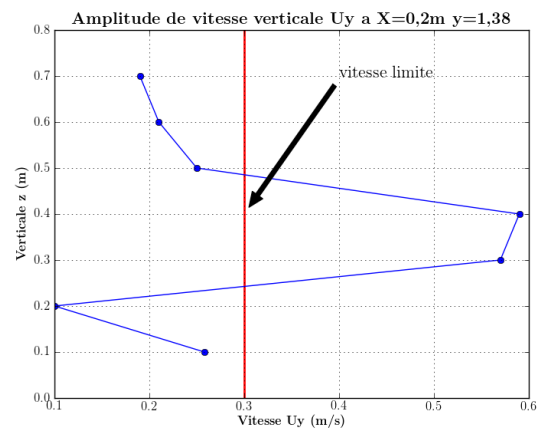
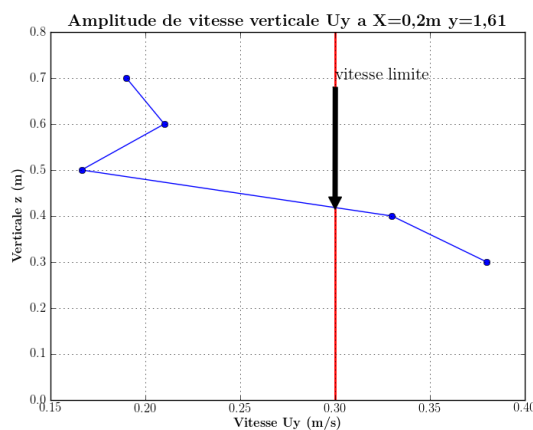
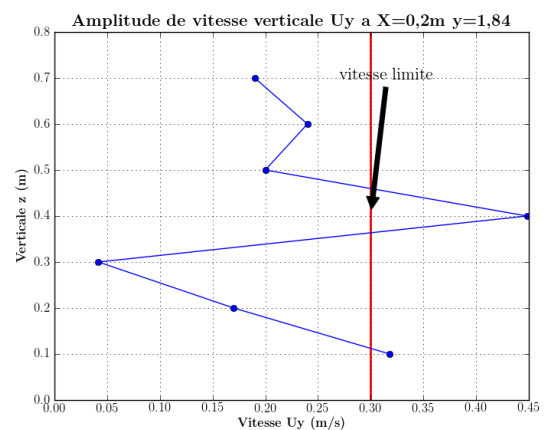


FIGURE A.11 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,46m


FIGURE A.12 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,69\text{m}$

FIGURE A.13 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,92\text{m}$

FIGURE A.14 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,15\text{m}$

FIGURE A.15 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,38\text{m}$

FIGURE A.16 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,61\text{m}$

FIGURE A.17 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,84\text{m}$

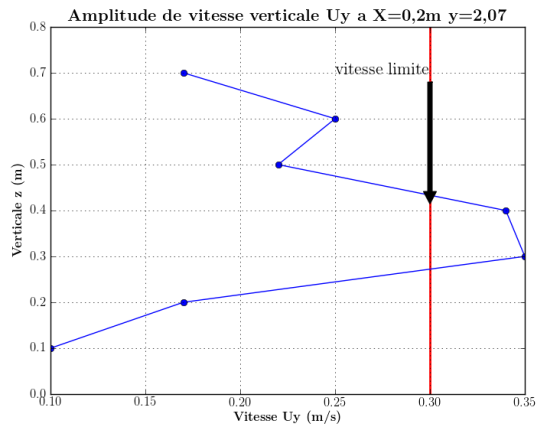


FIGURE A.18 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=2,07m

A.3 Profils verticaux l'amplitude de vitesse à x=0,3m

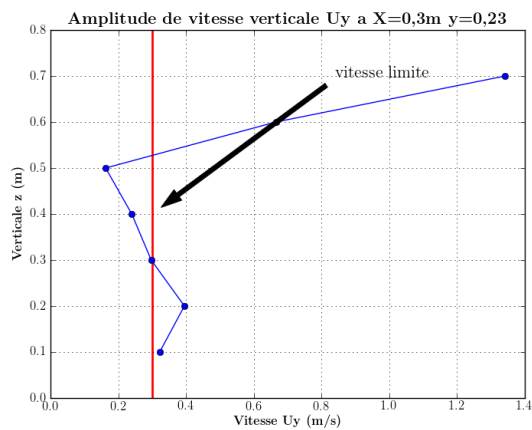


FIGURE A.19 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,23m

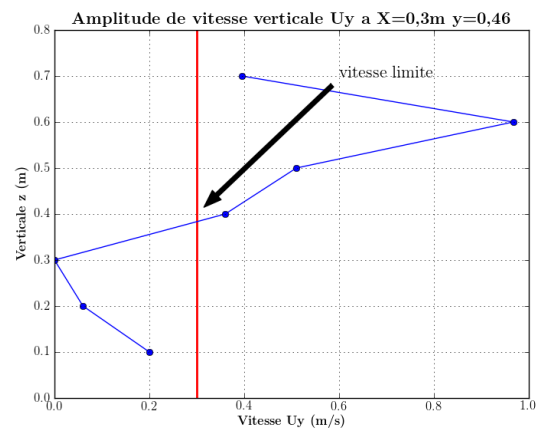


FIGURE A.20 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,46m

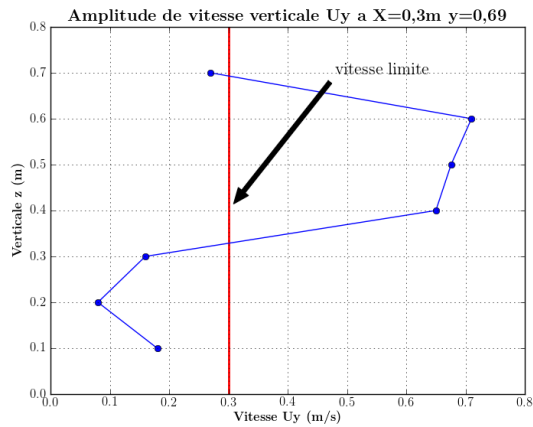


FIGURE A.21 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,69\text{m}$

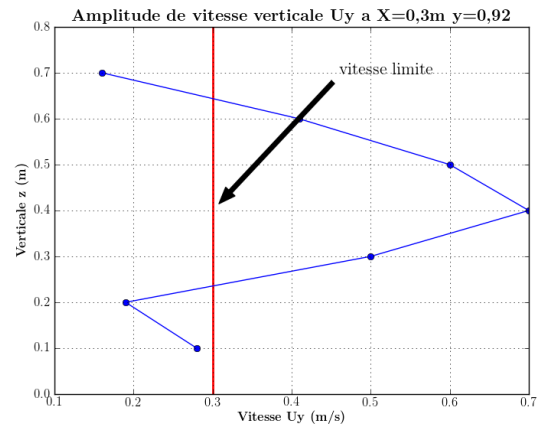


FIGURE A.22 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,92\text{m}$

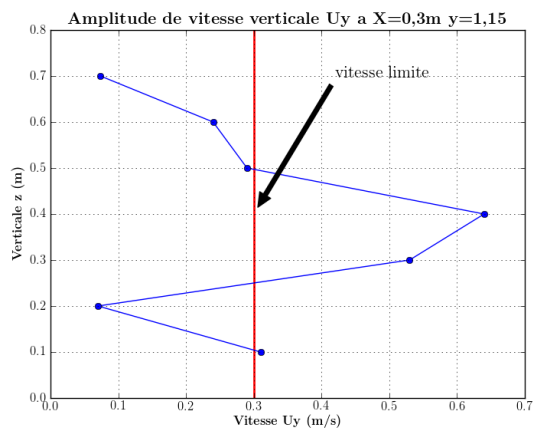


FIGURE A.23 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,15\text{m}$

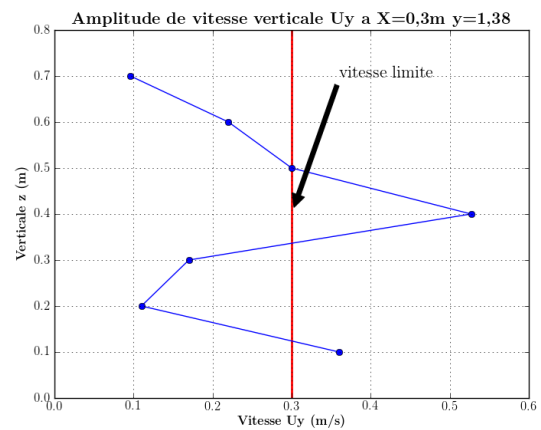


FIGURE A.24 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,38\text{m}$

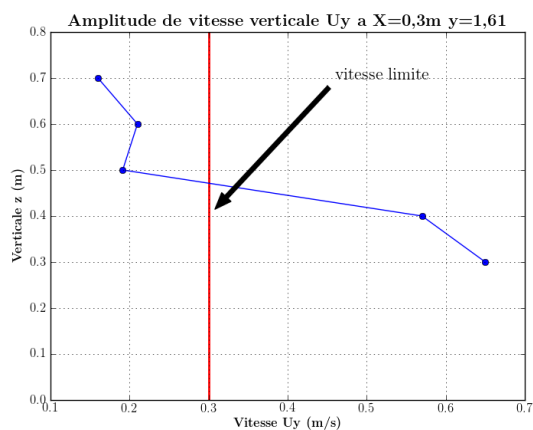


FIGURE A.25 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,61\text{m}$

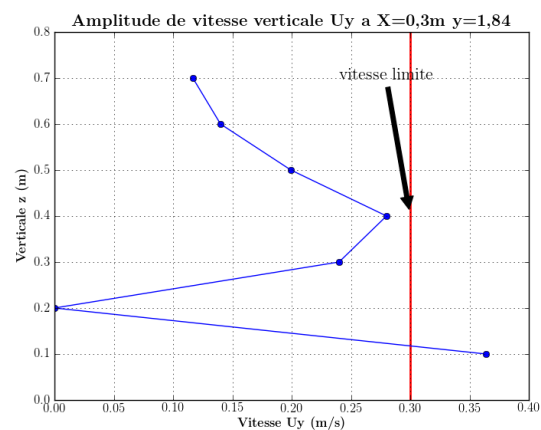


FIGURE A.26 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,84\text{m}$

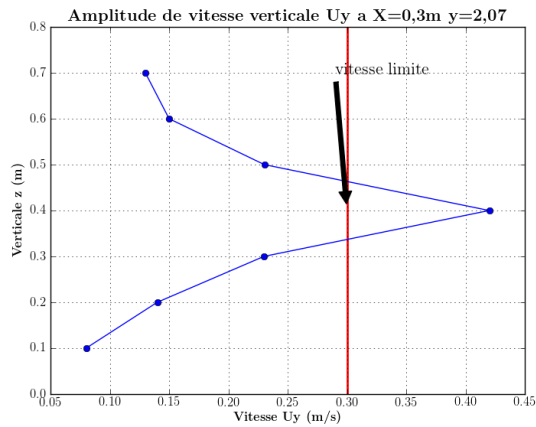


FIGURE A.27 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=2,07m

A.4 Profils horizontaux l'amplitude de vitesse à x=0,4m

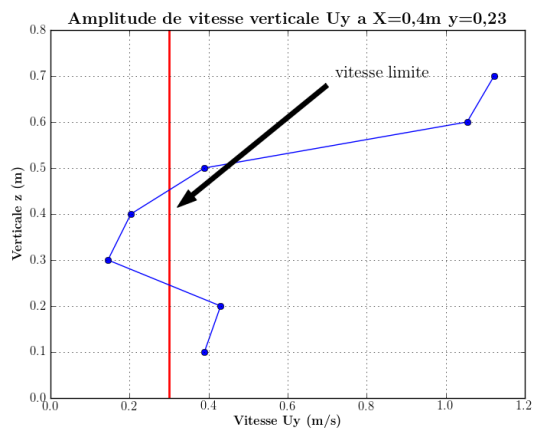


FIGURE A.28 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,23m

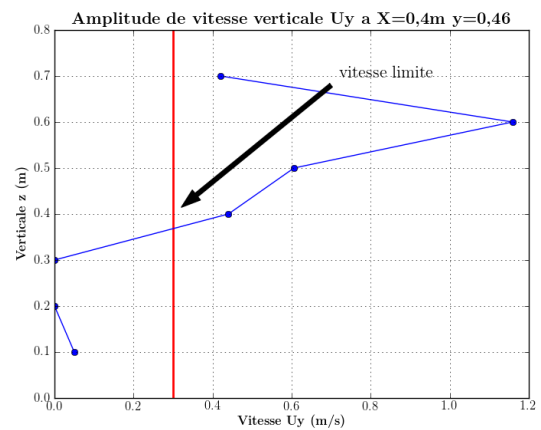


FIGURE A.29 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,46m

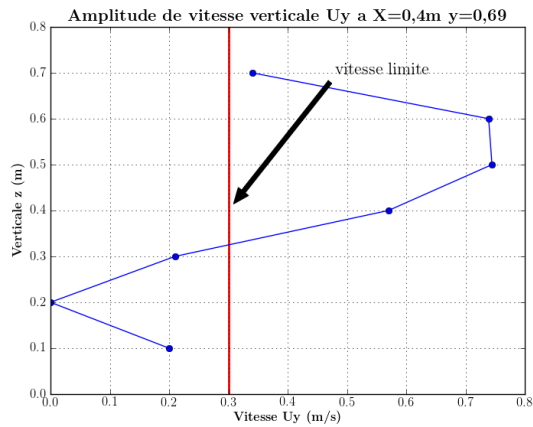


FIGURE A.30 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,69m

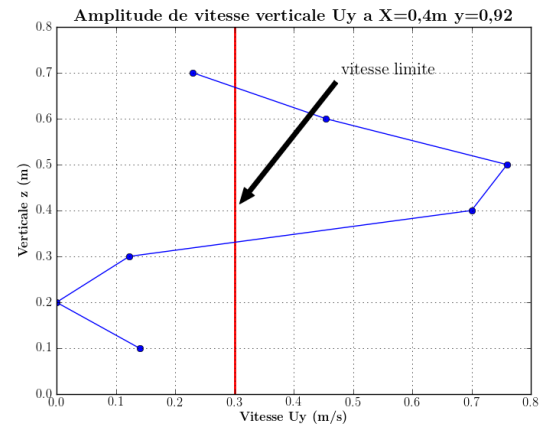


FIGURE A.31 – PProfil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,92m

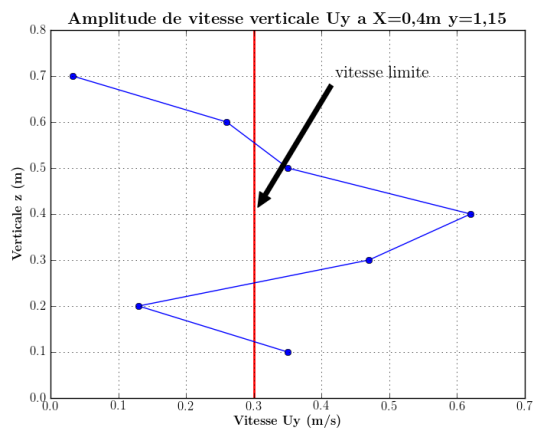


FIGURE A.32 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=1,15m

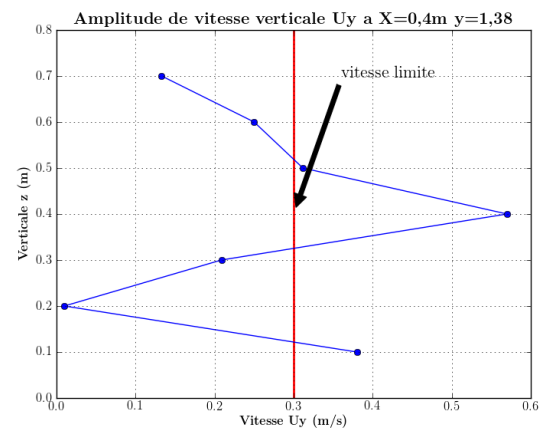


FIGURE A.33 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=1,38m

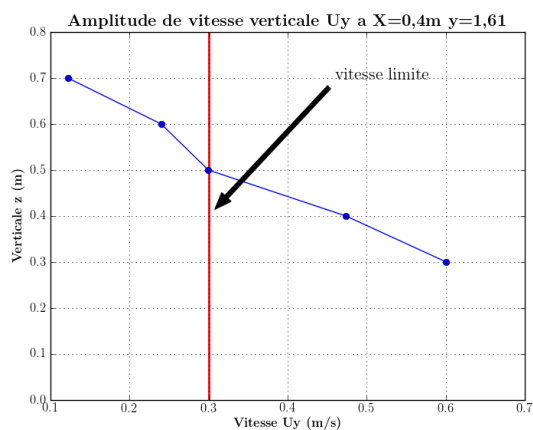


FIGURE A.34 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=1,61m

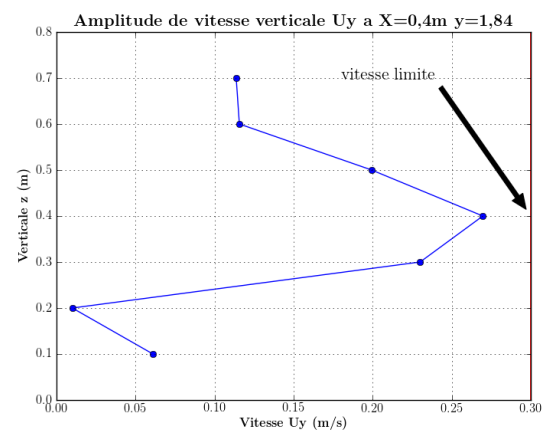


FIGURE A.35 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=1,84m

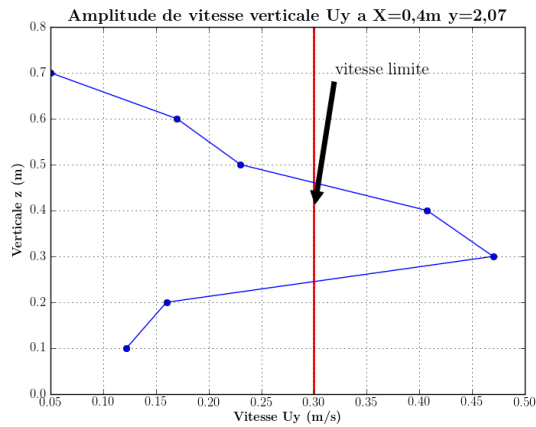


FIGURE A.36 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=2,07m$

A.5 Profils horizontaux l'amplitude de vitesse à $x=0,5m$

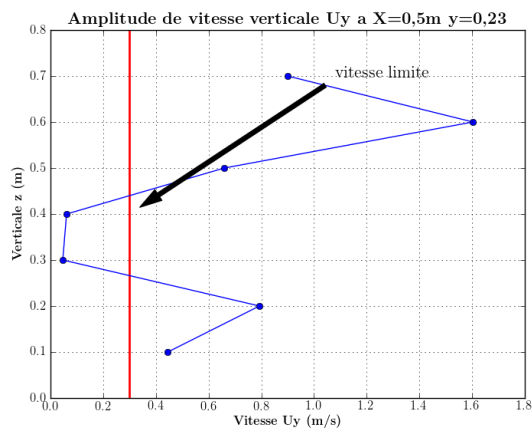


FIGURE A.37 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,23m$

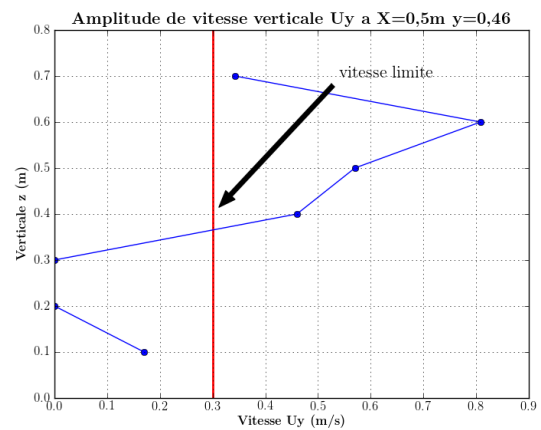


FIGURE A.38 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,46m$

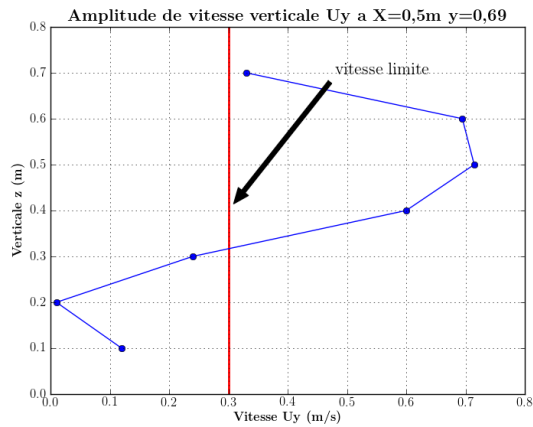


FIGURE A.39 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,69\text{m}$

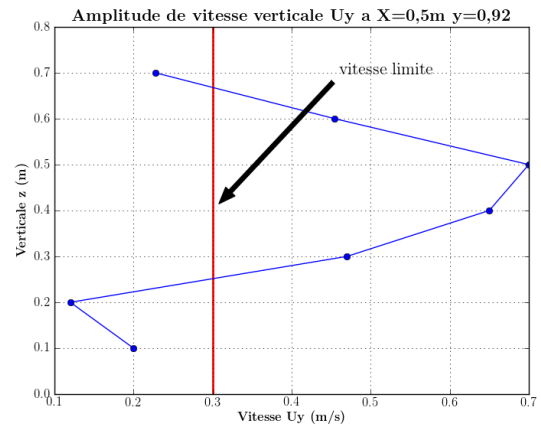


FIGURE A.40 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=0,92\text{m}$

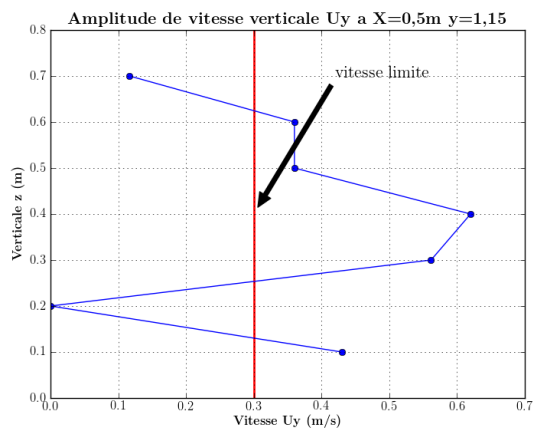


FIGURE A.41 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,15\text{m}$

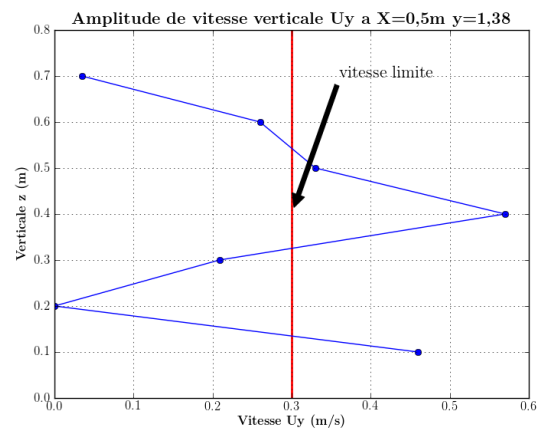


FIGURE A.42 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,38\text{m}$

A.6 Profils horizontaux l'amplitude de vitesse à x=0,6m

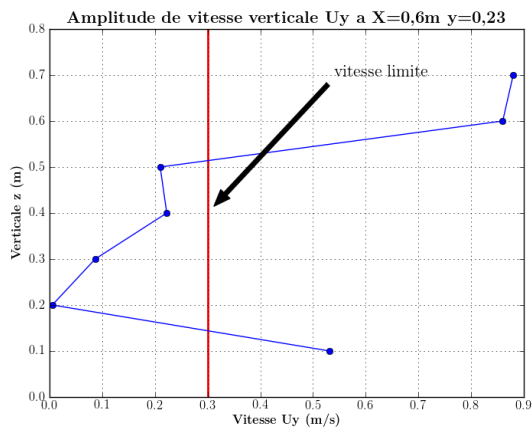


FIGURE A.43 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,23m

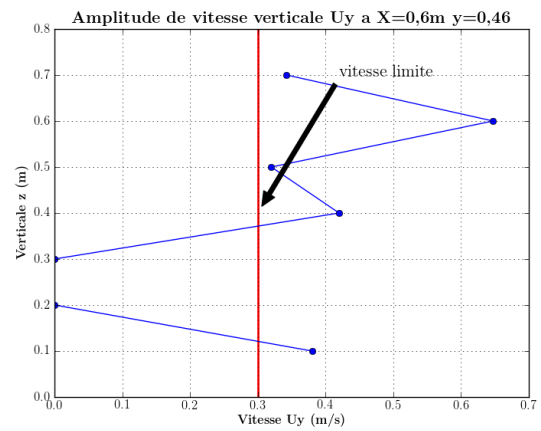


FIGURE A.44 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,46m

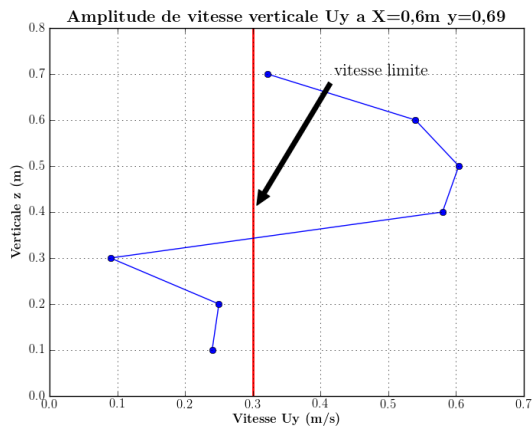


FIGURE A.45 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,69m

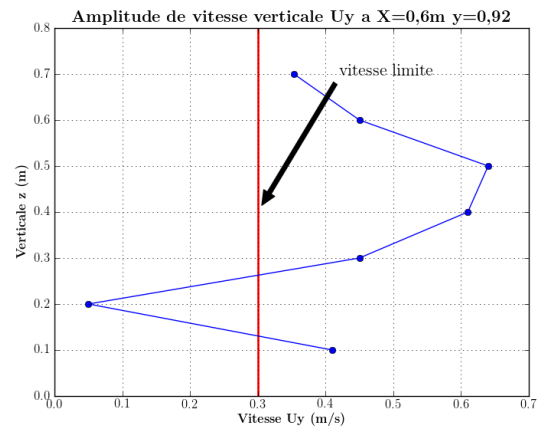


FIGURE A.46 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,92m

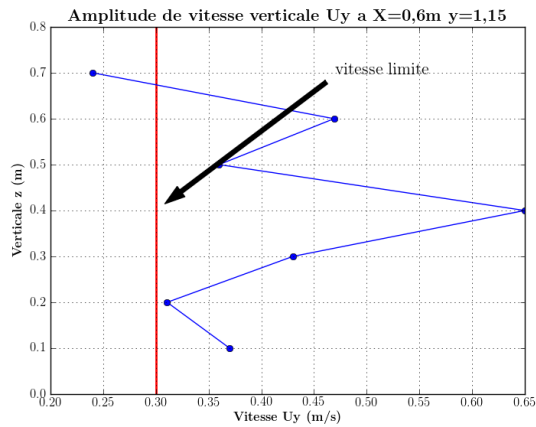


FIGURE A.47 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=1,15m

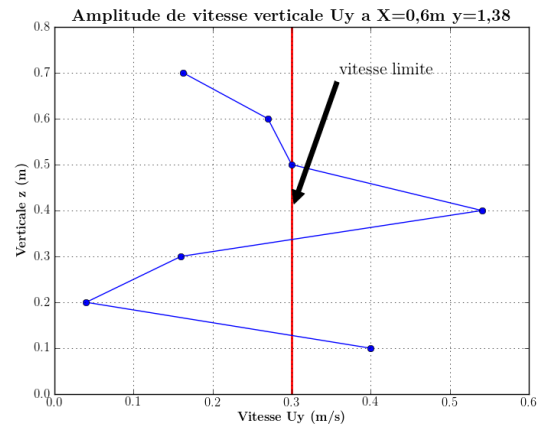


FIGURE A.48 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=1,38m

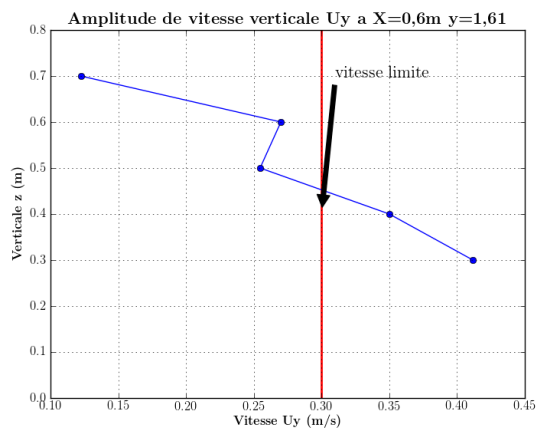


FIGURE A.49 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=1,61m

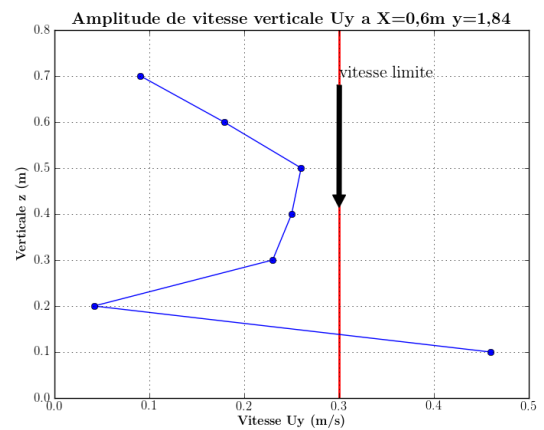


FIGURE A.50 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=1,84m

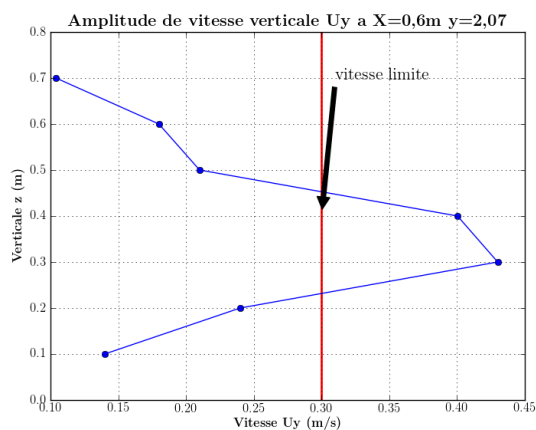


FIGURE A.51 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=2,07m

A.7 Profils verticaux l'amplitude de vitesse à x=0,7m

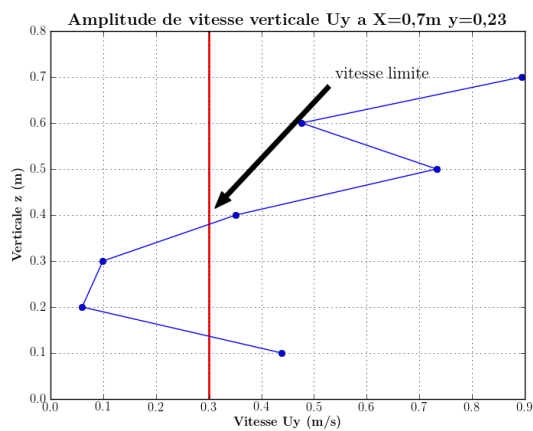


FIGURE A.52 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,23m

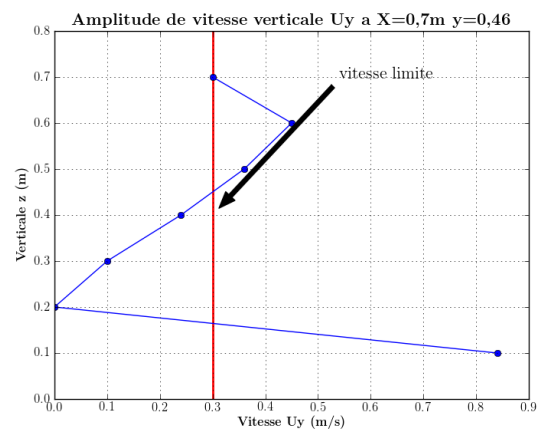


FIGURE A.53 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,46m

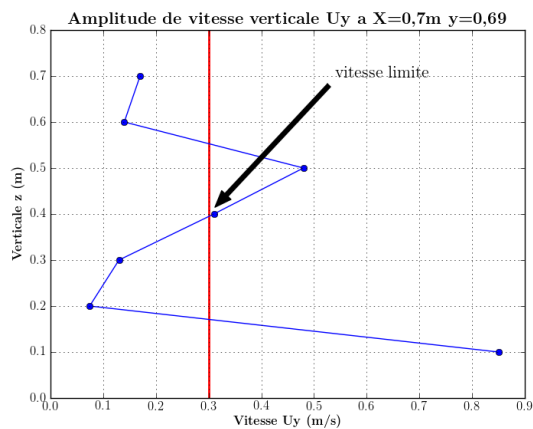


FIGURE A.54 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,69m

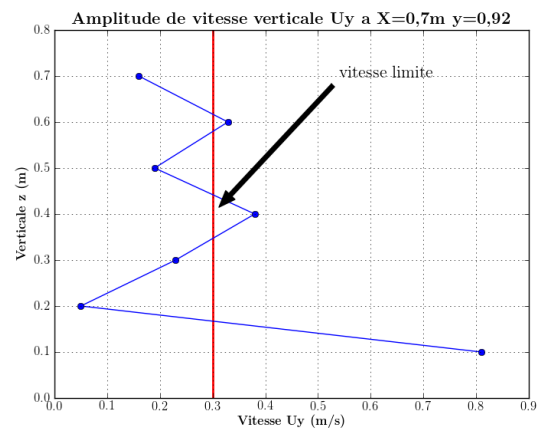


FIGURE A.55 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,92m

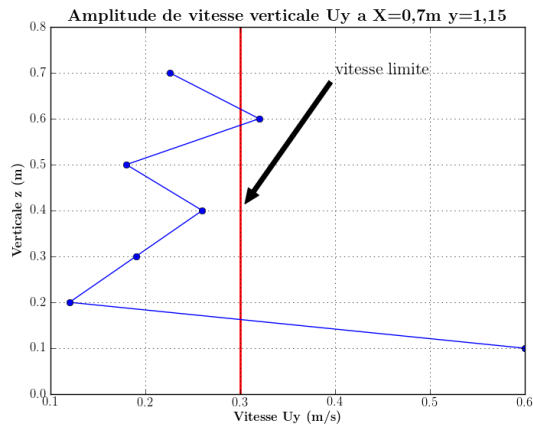


FIGURE A.56 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=1,15m

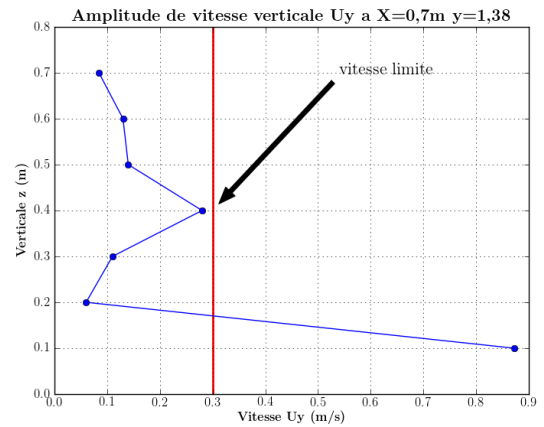


FIGURE A.57 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=1,38m

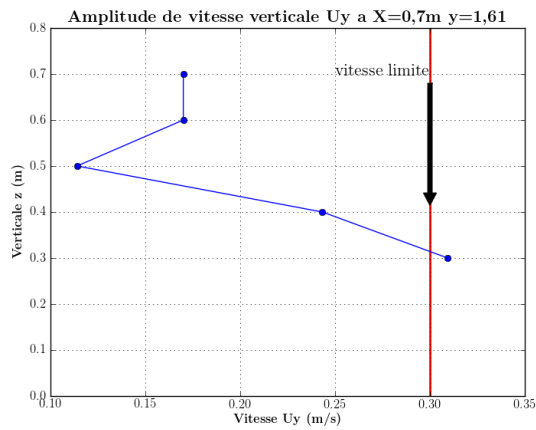


FIGURE A.58 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=1,61m

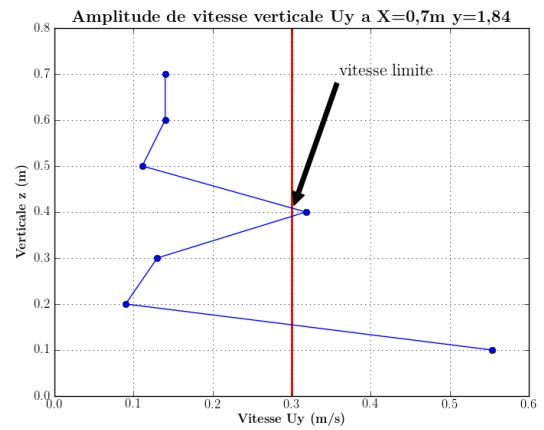


FIGURE A.59 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=1,84m

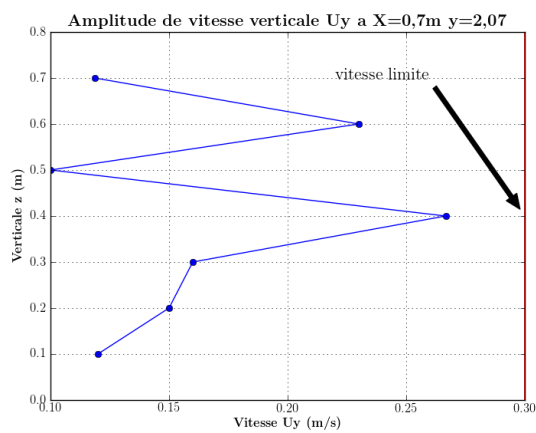


FIGURE A.60 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=2,07m

A.8 Profils verticaux l'amplitude de vitesse après ajout d'un filtre amortisseur de turbulence

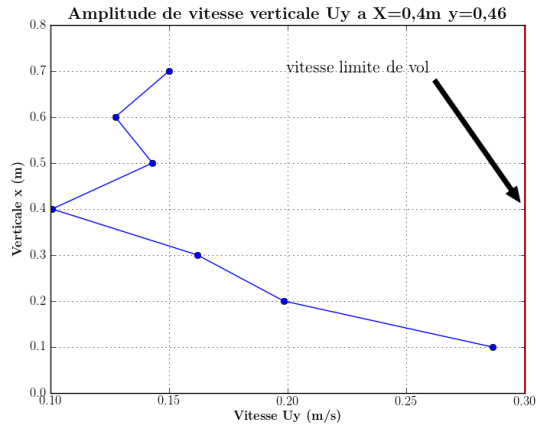


FIGURE A.61 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,46m

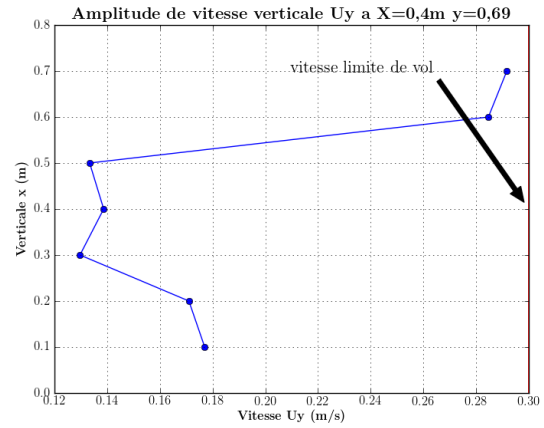


FIGURE A.62 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,69m

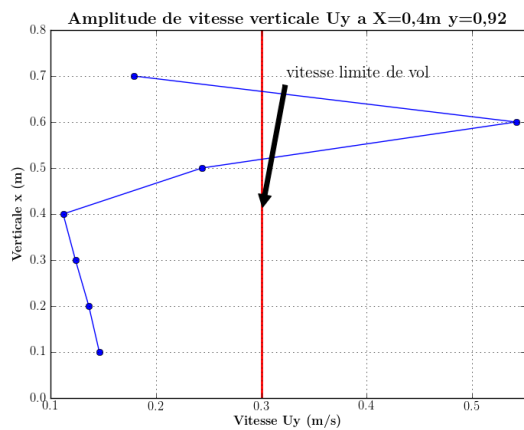


FIGURE A.63 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=0,92m

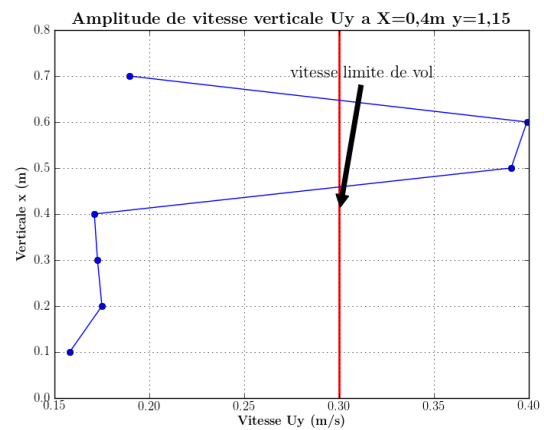
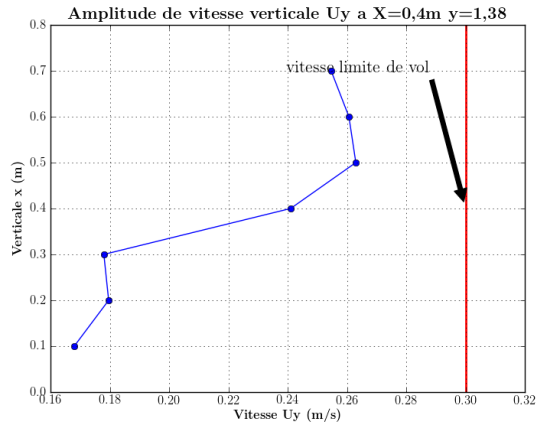
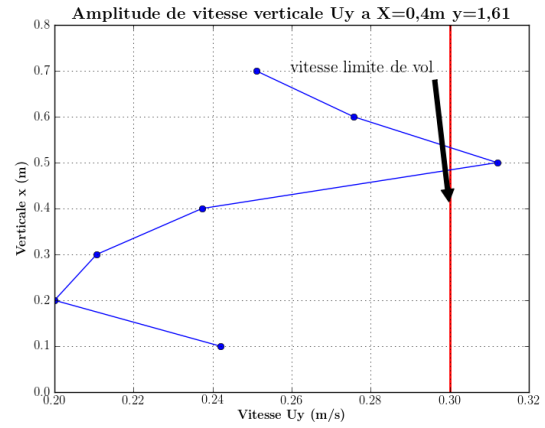
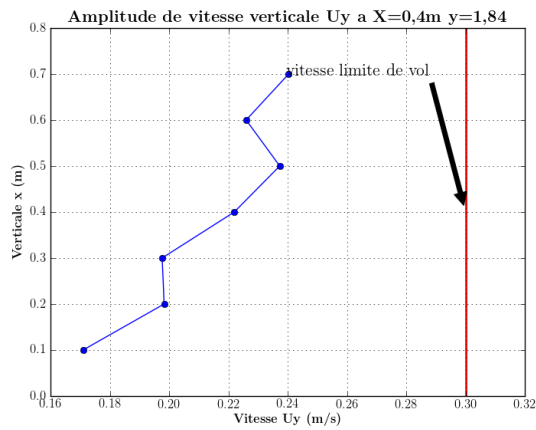
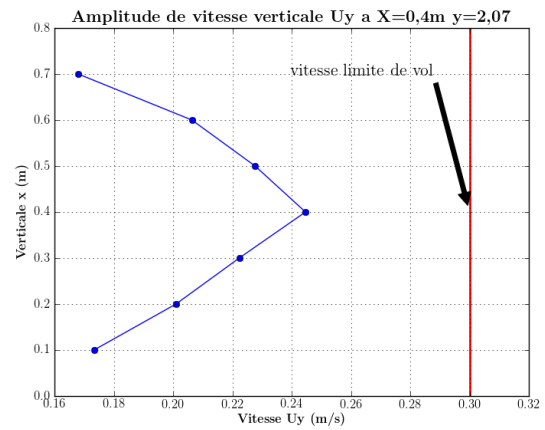
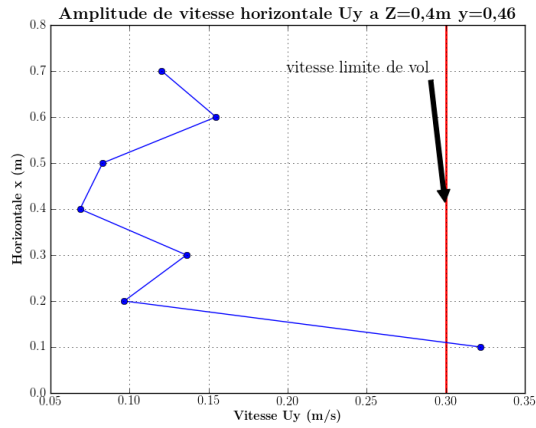
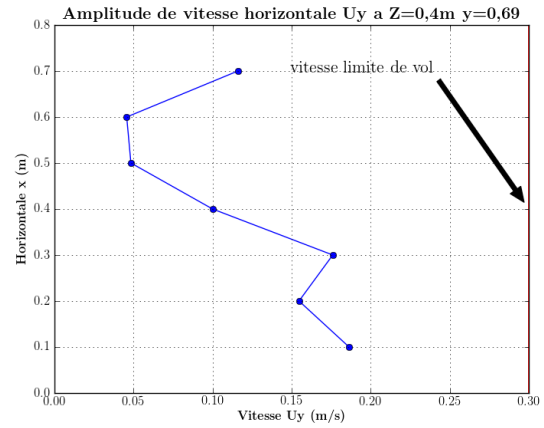
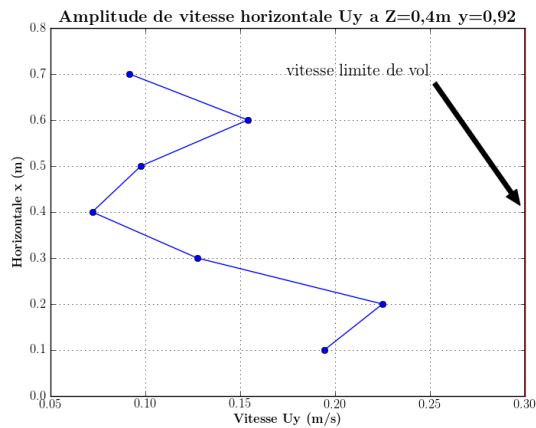
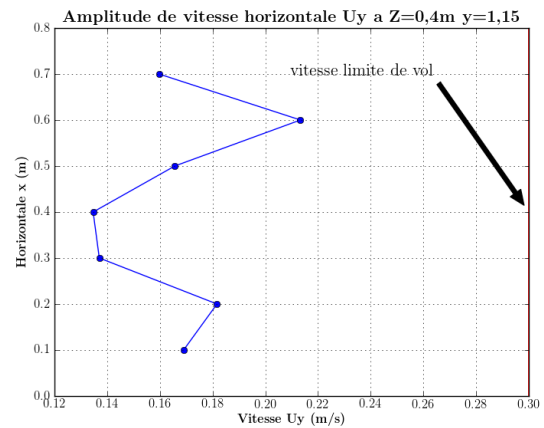


FIGURE A.64 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à y=1,15m


FIGURE A.65 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,38m$

FIGURE A.66 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,61m$

FIGURE A.67 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=1,84m$

FIGURE A.68 – Profil vertical de l'amplitude de vitesse à $y=2,07m$

A.9 Profils horizontaux l'amplitude de vitesse après ajout d'un filtre amortisseur de turbulence

FIGURE A.69 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y = 0,46\text{m}$ FIGURE A.70 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y = 0,69\text{m}$ FIGURE A.71 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y = 0,92\text{m}$ FIGURE A.72 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y = 1,15\text{m}$

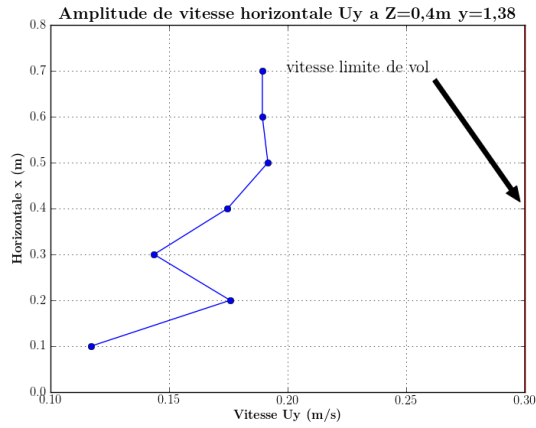


FIGURE A.73 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y = 1,38\text{m}$

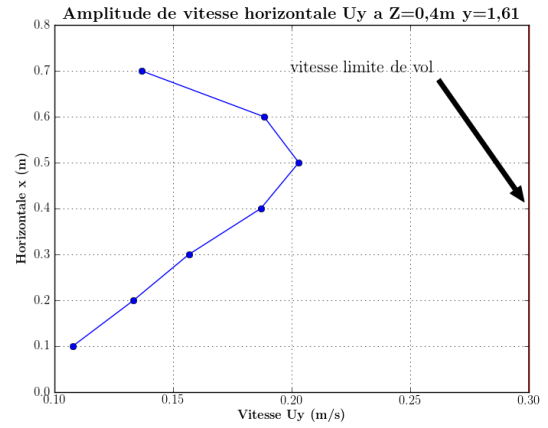


FIGURE A.74 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y = 1,61\text{m}$

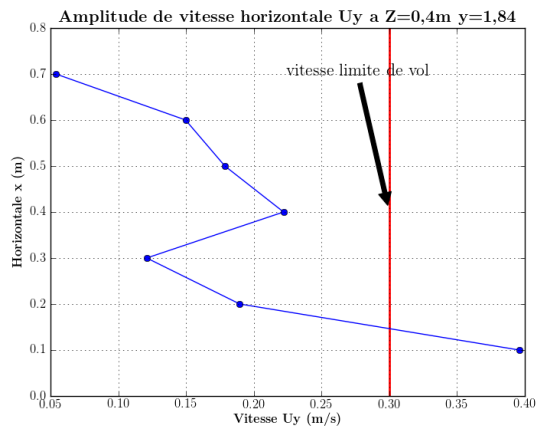


FIGURE A.75 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y = 1,84\text{m}$

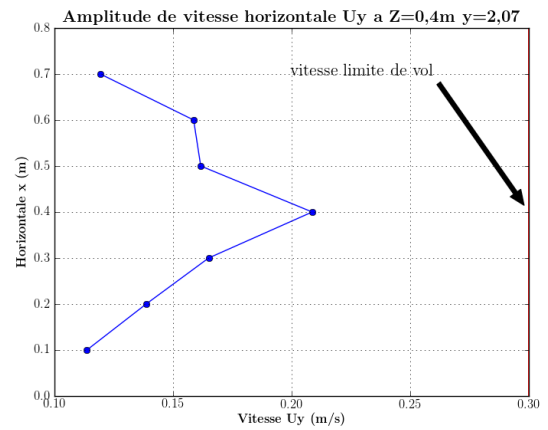


FIGURE A.76 – Profil horizontal de l'amplitude de vitesse à $y = 2,07\text{m}$

ANNEXE B

CARACTÉRISTIQUES DU TUNNEL DE VOL

B.1 Caractéristique du caisson de ventilation

Généralités

PRINCIPE

Le VEC est un ventilateur d'extraction en caisson destiné à l'évacuation de l'air vicié dans les locaux d'habitation et du tertiaire.

Il constitue l'élément de base de toute installation de VMC par extraction, celle-ci comprenant par ailleurs un réseau de conduits et accessoires, des bouches d'extraction et des entrées d'air.

Les différentes motorisations, une ou deux vitesses, permettent de couvrir des débits de 100 à 10 000 m³/h, et de répondre ainsi aux besoins d'extraction de la plupart des locaux.

Les pressions disponibles réglables offrent une plage d'utilisation en adéquation avec les pertes de charges courantes des réseaux et le fonctionnement des bouches autoréglables, tout en respectant les niveaux acoustiques intérieurs et extérieurs au bâtiment.

Enfin, tous les caissons (hors C.VEC 240 H) sont livrés avec l'ensemble motoventilateur monté sur des rails coulissants, facilitant l'accès et la maintenance des pièces intérieures.

DOMAINE D'APPLICATION

En habitat collectif neuf, les VEC sont utilisés dans le cadre de systèmes de VMC ou VMC Gaz par extraction.

En habitat collectif existant, les plages de débit et les pressions réglables permettent de s'adapter aux contraintes de la rénovation.

En tertiaire enfin, ils peuvent s'intégrer aux systèmes de ventilation mécanique par extraction de la plupart des locaux de petite et moyenne importance.

ENVIRONNEMENT RÉGLEMENTAIRE

- Règlement sécurité incendie : la gamme des ventilateurs en caisson VEC est homologuée Catégorie 4 (hors modèles spécifiés dans le tableau ci-après).
- Norme Française NF XP 50-410 (DTU 68.1) et P 50-411 (DTU 68.2) : tous les modèles de la gamme respectent les conditions techniques définies par ces normes qui concernent les installations de Ventilation Mécanique Contrôlée.
- Arrêté du 25 avril 1985 (modifié le 30 mai 1989) : celui-ci impose un entretien régulier des ventilateurs dans le cas d'une VMC Gaz.

- Conformité CE : le VEC est conçu et fabriqué conformément aux :
 - directive Machine / MD,
 - directive Compatibilité Électromagnétique / EMC
 - directive Basse Tension / LVD.

AVANTAGES

- **Aérodynamique** : courbes "plates" adaptées à la VMC dans le collectif.
- **Acoustique** : les performances des VEC permettent le respect des exigences de la NRA.
- **Classement au feu C4 (400°C 1/2 heure)** : PV CSTB n° 87.25590 et n° 89.28114.
- **Installation - Maintenance** : pattes de levage et motoventilateur sur glissières.

DESCRIPTION - GAMME

Le VEC existe en 3 tailles de caissons, avec plusieurs motorisations possibles, en 1 ou 2 vitesses (2 moteurs - 2 transmissions).

Le VEC se compose de :

- un caisson en tôle galvanisée,
- deux piquages d'aspiration en ligne,
- une ouïe de refoulement sur le dessus avec grillage de protection,
- l'ensemble moto-ventilateur à action monté sur rails coulissants et désolidarisé du caisson par plots anti-vibratiles,
- un entraînement poulie réglable / courroie trapézoïdale, permettant de modifier la vitesse du ventilateur et donc la pression disponible,
- un ou deux moteur(s) asynchrone(s) triphasé(s) 230/400 V, 50 Hz, classe F, IP 55,
- un interrupteur de proximité cadenassable en boîtier IP 65.

Tous les ventilateurs sont livrés avec une courroie de secours non montée.

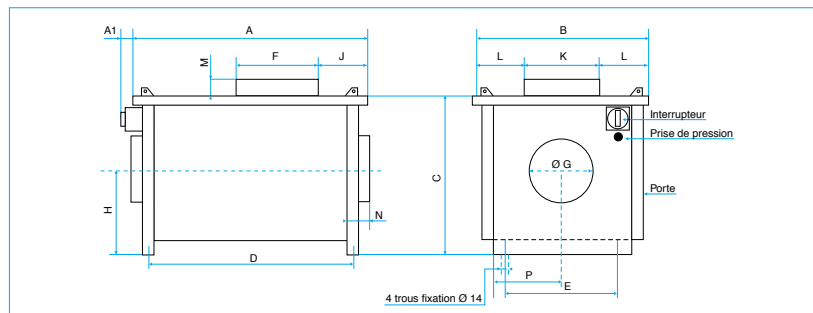
Adaptations possibles (ventilateurs non C4) :

- Raccordement PTO sur tous les moteurs de la gamme.
- Compatible avec le 60 Hz (une modification du rapport des poulies permet de rester dans les plages de fonctionnement et d'échauffement du moteur).
- Les VEC 1 vitesse peuvent être montés avec un moteur bi-vitesse (couplage Dalhander) + PTO.
- Moteurs tropicalisés.
- Isolation thermique.
- Ventilateur démontable (voir page 8).

FIGURE B.1 – Caractéristique du caisson de ventilation

Caractéristiques techniques

ENCOMBREMENT · POIDS



Modèle	A	A1	B	C	D	E	F	Ø G	H	J	K	L	M	N	P	Poids (kg) (1 moteur)	Nbre de piquages	Ø roue
C.VEC 240 H	780	64	667	687	745	340	278	315	380	176	342	162	0	40	310	51	2	240
VEC 271	1180	64	737	675	1130	600	270	400	355	372	336	200	120	40	340	75	2	271
VEC 321	1180	64	737	675	1130	600	322	400	355	320	400	168	140	40	340	80	2	321
VEC 382	1411	69	941	943	1382	717	455	500	470	374	535	205	120	60	439	150	2	381
VEC 452	1411	69	941	943	1382	717	455	500	470	374	535	205	120	60	439	170	2	457

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES ET MÉCANIQUES

Type	Vitesse moteur (tr/min)	Puissance moteur (kW)	Nombre de pôles	Vitesse roue (tr/min) Réglage mini - maxi + GV / PV	Puissance maxi consommée (W)	Intensité de protection à 400 V (A)
C.VEC 240 H	1500	0,37	4	710 - 1000	465	1,50
VEC 271 A	1500	0,37	4	640 - 800	780	2,00
VEC 271 B	1500	0,75	4	760 - 960	1400	2,40
VEC 321 A	1500	0,55	4	530 - 650	1000	2,40
VEC 321 B	1500	0,55	4	600 - 730	1250	2,40
VEC 321 C	1500	1,10	4	690 - 860	1800	3,20
VEC 382 A	1500	0,75	4	470 - 590	1600	2,40
VEC 382 B	1500	1,10	4	565 - 695	2200	3,20
VEC 382 C	1500	1,80	4	640 - 770	3000	4,30
VEC 452 A	1500	1,50	4	400 - 460	1750	4,30
VEC 452 B	1500	1,80	4	450 - 545	2380	5,30
VEC 452 C	1500	3,00	4	535 - 660	4000	8,50
VEC 271 H	1500	0,37	4	580 - 800	800	2,00
VEC 321 H	1500	0,55	4	430 - 650	1000	2,40
VEC 382 H	1500	0,75	4	440 - 570	1500	2,40
VEC 271 AB	1500 / 1500	0,75 / 0,37	4/4	760 - 960 / 640 - 800	1400 / 780	2,40 / 2,00
VEC 321 AB	1500 / 1500	0,55 / 0,55	4/4	600 - 730 / 530 - 650	1250 / 1000	2,40 / 2,40
VEC 321 AC	1500 / 1500	1,10 / 0,55	4/4	690 - 860 / 530 - 650	1800 / 1000	3,20 / 2,40
VEC 382 AB	1500 / 1500	1,10 / 0,75	4/4	565 - 695 / 470 - 590	2200 / 1600	3,20 / 2,40
VEC 382 AC	1500 / 1500	1,80 / 0,75	4/4	640 - 770 / 470 - 590	3000 / 1600	4,30 / 2,40
VEC 452 AB	1500 / 1500	1,80 / 1,50	4/4	450 - 545 / 400 - 460	2380 / 1750	5,30 / 4,30
VEC 452 AC	1500 / 1500	3,00 / 1,50	4/4	535 - 660 / 400 - 460	4000 / 1750	8,50 / 4,30

4

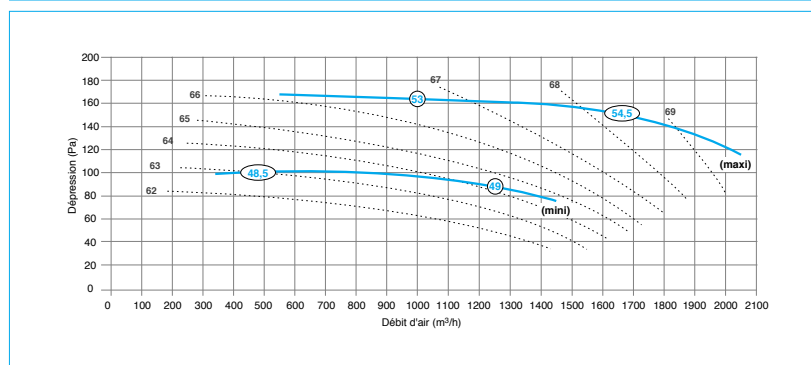
FIGURE B.2 – Caractéristiques géométriques du caisson de ventilation

Caractéristiques aérauliques

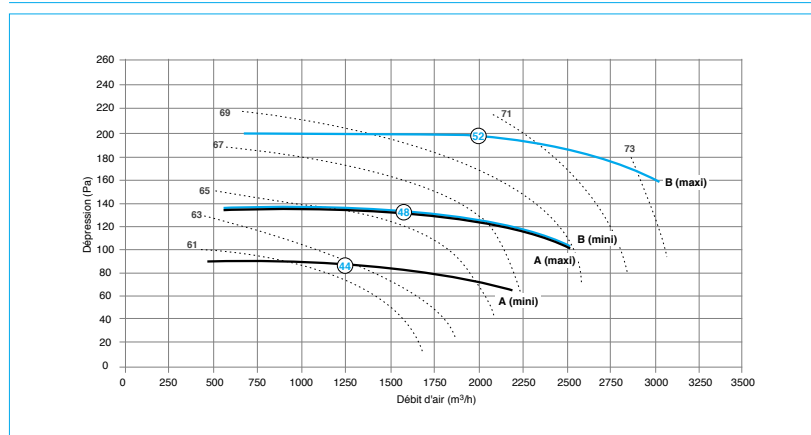
Les courbes suivantes donnent les caractéristiques aérauliques des caissons VEC.

Elles ont été établies selon la norme d'essai NF E 51-705 (refoulement libre), et donnent l'évolution de la pression (ΔP totale) à l'ouïe du ventilateur en fonction du débit d'air extrait. Les valeurs acoustiques sont reportées sur la courbe (L_p à 4 mètres en dB(A) et L_w en conduit en dB(A)).

C.VEC 240 H



VEC 271



- ④ L_p à 4 m : niveau de pression acoustique global en dB(A), rayonné en champ libre sur plan réfléchissant.
68 --- L_w : niveau de puissance acoustique en dB(A), en conduit.

6

FIGURE B.3 – Caractéristique aérauliques du caisson de ventilation

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Aluja *et al.*, 1993] ALUJA, M., PROKOPY, R., BUONACCORSI, J. et R.T., C. (1993). Wind tunnel assays of olfactory responses of females *Rhagoletis pomonella* flies to apple volatiles :effect of wind speed and odour release rate. *Ent. exp. and appl.*
- [Baker et Linn Jr., 1984] BAKER, T. et LINN JR., C. (1984). *Wind tunnel in pheromone Research*, chapitre 3, pages 75–110.
- [Brundrett, 1993] BRUNDRETT, E. (1993). Prediction of pressure drop for incompressible flow through screens. *Journal of Fluids Engineering*.
- [Cardé et Hagaman, 1979] CARDÉ, R. et HAGAMAN, T. (1979). Behavioral responses of the gypsy moth in a wind tunnel to air-borne enantiomers of disparlure. *Environmental Entomology*.
- [Felix, 2008] FELIX, a.-e. (2008). *Ecologie chimique et approche phylogénétique chez trois especes de Lépidoptères africains du genre Busseola(Noctuidae)*. Thèse de doctorat, université Paris XI.
- [Kainoh, 2011] KAINOH, Y. (2011). *Wind tunnel : a tool to test flight response of insects to semiochemicals*, chapitre 5, pages 89–98.
- [Kennedy *et al.*, 1980] KENNEDY, J., LUDLOW, A. et SANDERS, C. (1980). Guidance system used in moth sex attraction. *Nature*.
- [Kennedy *et al.*, 1974] KENNEDY, J., MARSH, D. *et al.* (1974). Pheromone-regulated anemotaxis in flying moths. *Science*, 184(140):999–1001.
- [Kennedy *et al.*, 1981] KENNEDY, J. S., LUDLOW, A. R. et SANDERS, C. J. (1981). Guidance of flying male moths by wind-borne sex pheromone. *Physiological Entomology*, 6(4):395–412.
- [Manshadi, 2011] MANSHADI, M. D. (2011). *The importance of turbulence reduction in assessment of wind tunnel flow quality*, chapitre 12, pages 261–278.
- [Marsh *et al.*, 1974] MARSH, D., KENNEDY, J. et LUDLOW, A. (1974). An analysis of anemotactic zigzagging flight in male moths stimulated by pheromone. *Physiological Entomology*, 3(3):221–240.
- [Mikhailova *et al.*, 1994] MIKHAILOVA, N., REPIK, E. et SODESKO, P. (1994). Optimal controle of free stream turbulence intensity by means of honeycombs. *fluids Dynamics*.

- [Miller et Roelofs, 1978] MILLER, J. et ROELOFS, W. (1978). Sustained-flight tunnel for measuring insect responses to wind-borne sex pheromones. *J. Chem. Ecol.*
- [Pinker et Herbert, 1967] PINKER, R. et HERBERT, M. (1967). Pressure loss associated with compressible flow through square mesh wire gauzes. *Journal of Mechanical Engineering Science.*
- [Reynolds, 1883] REYNOLDS, O. (1883). An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. *Proceedings of the Royal Society of London*, 35(224-226):84–99.
- [Van Dyke, 1982] VAN DYKE, M. (1982). An album of fluid motion. *Parabolic press.*
- [Visser, 1976] VISSER, J. (1976). The design of a low-speed tunnel as an instrument for the study of olfactory orientation in the colorado beetle. *Ent. exp. and appl.*
- [Visser et Griepink, 1996] VISSER, J. et GRIEPINK, F. (1996). Wind tunnel bioassays of the *Symmetrischema tangolias* sex pheromone. *Entomol. exp. appl.*